



Filipa Alexandra Soares Botelho Miguel

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Inspecção de Infraestruturas Ferroviárias.

Avaliação não destrutiva com o Radar de
Prospecção.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadora: Doutora Simona Fontul, Professora
Auxiliar Convidada, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu

Arguente: Prof. Doutor José Nuno Varandas

Vogal: Prof. Doutora Simona Fontul

Inspecção de Infraestruturas Ferroviárias. Avaliação não destrutiva com o Radar de Prospecção.

Copyright © de Filipa Alexandra Soares Botelho Miguel, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Chega ao fim mais um objectivo a que me propus. Sinto agora o sabor amargo do trabalho. Tenho a agradecer a muitas pessoas, que me ajudaram ao longo do curso e ao longo da realização desta dissertação. E aos que aqui não forem mencionados, dirijo, ainda assim, um grande obrigado.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão à Professora Doutora Simona Fontul, por ter aceite ser minha orientadora, por todo o conhecimento que partilhou, por todo o tempo disponibilizado e pela confiança demonstrada ao longo da realização desta dissertação. Obrigada pela sua boa disposição em todos os momentos.

Gostaria também de agradecer à Eng. Vânia Marecos e ao Técnico Superior Rui Coelho pela ajuda que prestaram e pelo conhecimento transmitido durante os ensaios de laboratório no LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil e também à Eng. Mercedes Solla Carracelas da Universidade de Vigo.

Devo um agradecimento especial ao LNEC, por promover condições para a realização dos ensaios e à Infraestruturas de Portugal pela disponibilização de dados para os casos de estudo.

Aproveito também para expressar a minha gratidão a todos os professores de Engenharia Civil do departamento da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa por me terem transmitido os seus conhecimentos e me ajudarem a ser uma melhor profissional. Em especial aos professores e amigos Ildi Cismasiu, Corneliu Cismasiu e Maria Teresa Santana.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos de infância e aos que conheci ao longo do curso, aos amigos das aventuras e desventuras. Todos, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho. Obrigada pelo companheirismo, entrega e força transmitida, Inês Veríssimo, Tiago Caixinha, e Carolina Monteiro.

Em especial, queria agradecer à minha família, Avó, Marta, Mãe e Pai. Obrigada por terem estado presentes e, especialmente, obrigada pelo tempo despendido e pelos conselhos sem fim.

RESUMO

As infraestruturas ferroviárias são cada vez mais, essenciais para o serviço de mobilidade de pessoas e bens em curtas e em longas distâncias.

A notável evolução da indústria e da tecnologia impulsionou o desenvolvimento socioeconómico dos países e por sua vez, a densidade das redes de transporte. Com base nesta expansão as entidades gestoras dos caminhos-de-ferro têm como função oferecer cada vez melhores serviços de transporte e, por conseguinte, garantir um elevado nível de segurança e conforto aos passageiros conjugando-os, claro, com os recursos que dispõem. Hoje em dia, as noções de manutenção e conservação das vias férreas estão directamente ligadas com a segurança dos utilizadores. Daqui resulta que as inspecções das vias são cada vez mais importantes para o bom funcionamento das mesmas.

Assim, o objectivo desta dissertação consiste em propor uma metodologia para uma melhor avaliação das infraestruturas ferroviárias em tempo real. Ou seja, o intuito será de diminuir o tempo de inspecção das vias férreas, com base na antecipada caracterização dos parâmetros eletromagnéticos dos materiais ferroviários, em especial, do balastro contaminado com solo.

Pretendeu-se desenvolver ensaios em laboratório que simulem as várias hipóteses de contaminação do balastro que podem existir numa via tradicional, variando o nível de contaminação do balastro e o teor em água do solo. Posteriormente, através da medição em contínuo da camada de balastro, com o apoio do radar de prospecção, GPR, irão ser estudadas as constantes dieléctricas dos diferentes casos de estudo.

A metodologia em estudo procura estabelecer uma relação entre os dados obtidos em laboratório, através do radar de prospecção, e a medição dos parâmetros geométricos de via numa via em serviço, analisando, principalmente, as zonas de deterioração. A utilização do GPR mostrou ser uma ferramenta eficiente para avaliação da condição da via, permitindo observar a evolução ao longo do tempo da contaminação do balastro.

Termos-chave: Infraestruturas Ferroviárias; Balastro; Veículo de Inspeção – EM 120; Radar de Prospecção – GPR; Constante Dielétrica.

ABSTRACT

The railway infrastructures are increasingly important in terms of providing various types of people and goods a means of mobility over long and short distances.

The remarkable evolution of industry and technology has boosted economic and social development of countries and in turn, the density of transportation networks. Based on this expansion, the managing bodies of railways have provided better transportation services and have ensured a high level of safety and comfort for their passengers, within their capabilities and resources. Today, the maintenance and conservation notions of railways are directly linked with the safety of users. Thus, one can easily see that a timely inspection of railroads is of the utmost importance, as it guarantees that they remain functioning in good order.

As such, the aim of this dissertation is to propose a methodology for a better assessment of rail infrastructure in real time. That is, the goal is to reduce the inspection time of railways, based on prior characterization of the electromagnetic parameters of railway materials, in particular in the ballast contaminated with soil.

Laboratory tests were conducted to simulate the different ballast degrees of contamination that may exist in a traditional railway, by varying the level of contamination of the ballast and soil water content. Subsequently, by measuring continuously the ballast layer, with the support of ground penetrating radar, GPR, the dielectrical constants of the different case studies was reviewed.

This methodology has the objective to establish a relationship between the data obtained in the laboratory, through the prospecting radar, and the measurement of geometric parameters of via, analysing mainly the deterioration of key areas.

Keywords: Railway infrastructure; ballast; Inspection vehicle - EM 120; Ground Penetrating Radar - GPR; Dielectric Constant.

CONTEÚDO

I.	Prelúdio	1
I.I.	Enquadramento Histórico	1
I.II.	Enquadramento Teórico	3
I.III.	Objectivos e Metodologia	4
I.IV.	Estrutura de Conteúdo.....	5
II.	Parâmetros Geométricos de Via	7
I.I.	Introdução.....	7
I.II.	Bitola	8
II.I.i.	Classificações de Linhas	8
II.II.	Escala/Sobrelevação	10
II.III.	Nivelamento.....	11
II.III.i.	Nivelamento Longitudinal	11
II.III.ii.	Nivelamento Transversal	12
II.III.iii.	Empeno.....	13
II.IV.	Alinhamento	14
III.	Inspecção de Via	15
III.I.	Introdução.....	15
III.II.	Tipos de Inspecção de Via	16
III.III.	Veículos de Inspecção de Via	17
III.III.i.	Equipamentos Manuais.....	17
III.III.ii.	Equipamentos Automáticos	23
III.IV.	EM 120	25
III.IV.i.	Sistema de Inspecção de Geometria de Via	26
III.IV.ii.	Sistema de Inspecção do Perfil Transversal do Carril	31

III.IV.iii.	Sistema de Inspeção do Perfil Transversal de Via.....	32
III.IV.iv.	Equipamentos Instalados Recentemente	33
III.IV.v.	Processamento dos Dados Medidos	34
III.IV.vi.	Vantagens de utilização do EM 120.....	35
III.V.	Radar de Prospecção (GPR).....	35
III.V.i.	Descrição geral	35
III.V.ii.	Princípios de funcionamento.....	37
III.V.iii.	Aplicações do GPR na inspeção de infraestruturas férreas.....	40
III.V.iv.	Limitações do GPR.....	43
III.V.v.	Desenvolvimentos notáveis na área	43
IV.	Degradação de Via - Balastro	45
IV.I.	Introdução.....	45
IV.II.	Parâmetros de Avaliação do Nível de Contaminação do Balastro.....	50
IV.II.i.	Introdução	50
IV.II.ii.	Índice de Contaminação.....	51
IV.II.iii.	Percentagem de Contaminação nos Vazios	51
IV.II.iv.	Índice Relativo da Contaminação do Balastro	52
IV.II.v.	Relação entre Parâmetros.....	53
V.	Casos de Estudo em Laboratório	55
V.I.	Introdução.....	55
V.II.	Caracterização dos Materiais	56
V.III.	Apresentação dos Casos de Estudo	61
V.III.i.	Caso 1 – Balastro Novo Limpo.....	63
V.III.ii.	Caso 2 – Balastro Usado Limpo.....	64
V.III.iii.	Caso 3 – Balastro Usado Contaminado	66
V.III.iv.	Caso 4 – Balastro Usado Muito Contaminado	67
V.III.v.	Caso 5 – Balastro Usado Contaminado e com Diferentes Teor em Água no Solo	

V.III.vi. Caso 6 – Balastro Usado Muito Contaminado e com Diferentes Teor em Água no Solo	70
V.IV. Equipamentos Utilizados	70
V.IV.i. GSSI air-coupled antennas.....	70
V.IV.ii. MALA ground-coupled antennas.....	72
V.V. Resultados Obtidos	72
V.VI. Análise dos Resultados	78
VI. Caso de Estudo de uma Via em Serviço	87
VI.I. Introdução	87
VI.II. Breve Caracterização	88
VI.III. Apresentação dos Casos de Estudo	91
VI.III.i. Caso 1 – Troço B – C.....	94
VI.III.ii. Caso 2 – Troço E – F	99
VI.IV. Análise dos Resultados	106
VII. Término	111
VII.I. Principais Conclusões	111
VII.II. Desenvolvimentos Futuros.....	113
Referências Bibliográficas	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1. Ilustração esquemática de uma Bitola.....	8
Figura II.2. Ilustração esquemática de um Alargamento de Bitola	9
Figura II.3. Ilustração esquemática de um Estreitamento de Bitola	10
Figura II.4. Ilustração esquemática de uma Sobreelevação/Escala	10
Figura II.5. Ilustração esquemática do defeito de Nivelamento Longitudinal	12
Figura II.6. Ilustração esquemática do defeito de nivelamento transversal.....	12
Figura II.7. Ilustração esquemática de um Empeno	13
Figura II.8. Ilustração esquemática de um Alinhamento dos rodados	14
Figura III.1. KRAB – Auscultador de geometria de via	18
Figura III.2. RMF – auscultador de geometria de via e desgaste ondulatório	19
Figura III.3. Veículo de inspeção de via através de ultrassons.....	20
Figura III.4. Computador de bordo do <i>KrautKramer USM25</i>	20
Figura III.5. <i>LaiserRail</i>	21
Figura III.6. Sobreposição do perfil do carril medido (linha vermelha) e novo (linha azul)	21
Figura III.7. <i>MiniProfRail</i>	22
Figura III.8. <i>MiniProfRail</i> - Medição dos parâmetros geométricos: a) Desgaste da cebeça do carril; b) Medição de AMV; c) Medição de Bitola.	23
Figura III.9. Iris 320 durante uma medição numa linha de alta velocidade	24
Figura III.10. Veículo de inspeção geométrica de via da REFER - EM 120	25
Figura III.11. Localização do equipamento de análise de geometria de via.....	26
Figura III.12. Computadores e Unidades de Controlo no equipamento EM 120	27
Figura III.13. Gráfico dos parâmetros geométricos	28
Figura III.14. Relatório Sumário	29
Figura III.15. Relatório de Índices de Qualidade.....	30
Figura III.16. Perfil Transversal do Carril.....	32

Figura III.17. Sistema de Laser de Medição	33
Figura III.18. Aspecto da medição com radar	34
Figura III.19. Constituição de um equipamento de GPR	36
Figura III.20. Unidade de Controlo do GPR.....	37
Figura III.21. Esquema de funcionamento do GPR	38
Figura III.22. Esquema de Aparelho de Mudança de Via (AMV): a) Reflexão do GPR; b) Ilustração.....	41
Figura III.23. Esquema de duas Passagens de Nível (PN): a) Reflexão do GPR; b) Ilustração ..	42
Figura III.24. Esquema de Ponte: a) Reflexão do GPR; b) Ilustração	42
Figura III.25. Esquema de Túnel: a) Reflexão do GPR; b) Ilustração	43
Figura IV.1. Infiltração dos materiais a partir da superfície	49
Figura IV.2. Infiltração dos materiais a partir das camadas granulares subjacentes ao balastro .	49
Figura IV.3. Infiltração de materiais a partir da fundação	50
Figura V.1. Curva granulométrica do solo argiloso (peneiração)	57
Figura V.2. Curva granulométrica do solo argiloso (sedimentação e peneiração)	57
Figura V.3. Curva granulométrica do balastro contaminado	58
Figura V.4. Curva granulométrica do balastro muito contaminado	58
Figura V.5. Fuso granulométrico do balastro contaminado	59
Figura V.6. Possível Modelo de Contaminação de uma Via	61
Figura V.7. Dimensões das quatro caixas.....	62
Figura V.8. Exemplo de colocação uma folha de alumínio no fundo de uma caixa	63
Figura V.9. Caixa a ser pesada	63
Figura V.10. Caixa 1 com balastro limpo e régua de medição	64
Figura V.11. Caixa 2 com balastro usado e régua de medição	65
Figura V.13. Esquema de colocação das camadas de balastro e de solo	66
Figura V.12. Comparação entre o balastro da caixa 1 e da caixa 2.....	66
Figura V.14. Representação gráfica das camadas de balastro e solo	67

Figura V.15. Representação gráfica das camadas de balastro e solo	68
Figura V.16. Colocação de água para a medição de diferentes teores em água	69
Figura V.17. Equipamento GSSI: a) à esquerda as antenas de 1,8 GHz e à direita as antenas de 1 GHz; b) em funcionamento; c) sistema de aquisição SIR 20 da GSSI.	71
Figura V.18. Equipamento MALA: a) antena de 1 GHz; b) antena de 2,3 GHz.	72
Figura V.19. Reflexão do GPR no caso de estudo 1	73
Figura V.20. Reflexão do GPR no caso de estudo 3	73
Figura V.21. Reflexão do GPR no caso de estudo 6B, do balastro muito contaminado e teor em água alto	74
Figura V.22. Análise dos resultados das constantes dielétricas para cada antena nos diversos casos de estudo	79
Figura V.23. Análise das constantes dielétricas nos casos de estudo 1 e 2	80
Figura V.24. Análise das constantes dielétricas na caixa 3, com 7,5% de contaminação (caso de estudo 3, 5A e 5B)	81
Figura V.25. Análise das constantes dielétricas na caixa 4, com 15 % de contaminação (caso de estudo 4, 6A e 6B)	82
Figura V.26. Análise das constantes dielétricas quanto ao estado do balastro	83
Figura V.27. Análise das constantes dielétricas quanto ao nível de contaminação	83
Figura V.28. Análise das constantes dielétricas quanto ao teor de água do solo	84
Figura V.29. Análise da gama máxima de variação das constantes dielétricas	85
Figura VI.1. Exemplo de uma janela de registo do GPR no programa de visualização e interpretação	93
Figura VI.2. Reflexões do GPR no caso de estudo 1 – Maio de 2013	95
Figura VI.3. Reflexões do GPR no caso de estudo 1 - Outubro de 2015	98
Figura VI.4. Reflexões do GPR nos pontos do caso de estudo 2	101
Figura VI.5. Reflexões do GPR no caso de estudo 2 - Outubro de 2015	104
Figura VI.6. Análise das Constantes Dielétricas para o caso de estudo 1	107
Figura VI.7. Análise das Constantes Dielétricas para o caso de estudo 2	108

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela III.1. Relação entre TQI e os níveis de qualidade de geometria de via	30
Tabela IV.1. Comparação entre a Via Balastrada e a Via Não Balastrada.....	47
Tabela IV.2. Categorias do Balastro Contaminado com base no PVC	52
Tabela IV.3. Categorias do balastro contaminado com base no FI e R_{b-f}	54
Tabela V.1. Índices FI e R_{b-f} para os dois tipos de balastro.....	60
Tabela V.2. Sumário dos diferentes Casos de Estudo.....	61
Tabela V.3. Caixas e respectivos pesos	62
Tabela V.4. Teor de água pretendido vs peso de água adicionado	69
Tabela V.5. Teor de água pretendido vs peso de água adicionado	70
Tabela V.6. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 1	75
Tabela V.7. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 2	75
Tabela V.8. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 3	76
Tabela V.9. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 4	76
Tabela V.10. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 5A.....	77
Tabela V.11. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 5B	77
Tabela V.12. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 6A.....	78
Tabela V.13. Apresentação das constantes dieléctricas para o caso de estudo 6B	78
Tabela VI.1. Cronograma das principais actividades	88
Tabela VI.2. RIV realizadas: troços e períodos de execução	89
Tabela VI.3. Estado da geometria de via em cada troço	90
Tabela VI.4. Classificação da Via relativamente à sua taxa de degradação	90
Tabela VI.5. Locais onde estão previstos os desguarnecimentos mecânicos pesados.....	92
Tabela VI.6. Locais escolhidos para análise nos diferentes casos de estudo	93

Tabela VI.7. Pontos analisados no caso de estudo 1.....	94
Tabela VI.8. Características dos pontos analisados no caso de estudo 1	94
Tabela VI.9. Resultados das constantes dielétricas no caso de estudo 1 - Maio de 2013	97
Tabela VI.10. Resultados das constantes dielétricas no caso de estudo 1 – Outubro de 2015 ..	99
Tabela VI.11. Pontos analisados no caso de estudo 2.....	100
Tabela VI.12. Características dos pontos analisados no caso de estudo 2	100
Tabela VI.13. Resultados das constantes dielétricas no caso de estudo 2 - Maio de 2013	102
Tabela VI.14. Resultados das constantes dielétricas no caso de estudo 2 – Outubro de 2015	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

AMV – Aparelho de Mudança de Via;
BC – Barra Curta;
BLS – Barra Longa Soldada;
EM120 – Veículo de Inspeção de Via Plasser & Theurer;
GPR (*Ground Penetrating Radar*) – Radar de prospecção;
IMU (*Inertial Measuring Unit*) – Unidade de medição inercial;
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
OGMS (*Optical Gage Measuring System*) – Sistema de medição ótico/ laser;
Pk – Ponto quilométrico;
PN – Passagem de nível;
QN – Nível de qualidade;
REFER – Rede Ferroviária Nacional, E.P.;
RIV – Renovação Integral de Via;
TQI (Track Quality Index) – Índice de qualidade da via.

SÍMBOLOS

σ – Condutividade elétrica;
 ε – Constante Dielétrica.
 G_{s-b} – Densidade específica do balastro;
 G_{s-f} – Densidade específica do material contaminado;
 e – Espessura da camada de balastro;
 FI – Índice de Contaminação;
 e_b – Índice de vazios do balastro;
 e_f – Índice de vazios do material contaminado;
Rb-f – Índice Relativo da Contaminação do Balastro;

M_b – Massa seca do balastro;

M_f – Massa seca do material contaminado;

P_4 – Percentagem de agregados finos que passam no peneiro 4,75mm;

P_{200} – Percentagem de agregados finos que passam no peneiro 0,075m;

PVC – Percentagem de Contaminação nos Vazios;

ρ – Resistividade;

twt – Tempo de percurso da onda;

v – Velocidade de propagação de onda;

V_1 – Volume de vazios entre as partículas de balastro;

V_2 – Volume total do material de contaminação (partículas que passam no peneiro 9,5mm);

I. PRELÚDIO

I.I. Enquadramento Histórico

Em meados do Século XVII, com início na Grã-Bretanha, deu-se a Revolução Industrial, ou seja, ocorreu um conjunto de mudanças tecnológicas que provocou um impacto no processo produtivo, quer a nível social como a nível económico. Os meios de transporte da altura eram limitados a veículos de tracção animal e não respondiam às necessidades crescentes de suprimir as lacunas existentes na necessidade de transportes de passageiros e cargas para distâncias cada vez maiores. Assim, como esta mudança e com a acumulação de capital que dela adveio, houve uma mudança radical nos meios de transporte terrestres com o aparecimento dos caminhos-de-ferro.

Contudo, durante as duas guerras mundiais, este desenvolvimento ferroviário sofreu um grande declínio. Estas infraestruturas necessitavam de recursos financeiros elevados para garantirem a sua manutenção e desenvolvimento. Assim, só se justificava o investimento nas travessias mais importantes, sendo que, o desenvolvimento ferroviário abrandou, e em alguns locais, chegou mesmo a parar.

Em particular na Europa, a reconstrução das linhas de caminho-de-ferro (tais como, a modernização de linhas e dos materiais ferroviários, as renovações de estações e a imposição de limites de segurança) após a II guerra mundial, era uma prioridade absoluta mas, a maioria dos países não possuía meios económicos para o fazer. Assim, em muitas vias férreas manteve-se a configuração de origem e as normas de construção antigas, fazendo uso de carris de perfil semelhante ao existente até à data e de travessas de madeira.

Os caminhos-de-ferro sofreram um enorme período de recessão e uma apertada concorrência por parte das vias rodoviárias.

A partir dos anos 80, começou a notar-se um período de mudança de mentalidade e surgiu uma redescoberta das virtudes dos caminhos-de-ferro. A procura de uma melhor qualidade de vida, a poluição, são conceitos que hoje em dia se tornaram preocupações políticas, e levou ao rejuvenescimento deste meio de transporte coletivo. Simultaneamente, surgiram também,

materiais inovadores que alteram a imagem obscura provocada por anos de imobilização (Leal, 2009).

Este período de mudança e o desenvolvimento progressivo das ligações ferroviárias entre as principais cidades europeias, levou ao enfoque das velocidades dos comboios. A ideia de permitir que as ligações se efectuassem em tempos mais curtos conduziu a inúmeras melhorias, tais como, a utilização de motores de locomoção mais rápidos. O aparecimento dos comboios de alta velocidade estabelece definitivamente a popularidade das automotoras, que voltaram a passar por uma nova mutação (Silva, 2012).

Inicialmente as vias ferroviárias eram utilizadas praticamente até à sua inoperacionalidade, sendo posteriormente necessário substituir os materiais degradados por materiais novos. Contudo, com a evolução dos tempos, surgiu uma nova perspectiva e os responsáveis pelas infraestruturas começaram a realizar intervenções nas vias antes da sua degradação total. Esta mudança de atitude permitiu alcançar um maior nível de qualidade ao que até então se conhecia e, com a efetivação de manutenções periódicas nas vias, com custos inferiores, era possível não se atingir a degradação total.

Apesar de toda a evolução nos materiais utilizados na construção da via, sabemos que esta se deforma e os seus elementos deterioram-se, uma vez que ao serem implementados são sujeitos a solicitações distintas que promovem a sua degradação descontínua. Em particular, as velocidades mais elevadas das composições nas vias resultam num aumento dos efeitos dinâmicos durante a operação, e, por conseguinte, conduzem a uma mais rápida degradação. Esta circunstância e as alterações climáticas podem provocar um pior desempenho da infraestrutura que influencia negativamente os outros componentes do transporte ferroviário, podendo mesmo aumentar o risco de descarrilamento.

Em Portugal, as primeiras linhas de caminho-de-ferro foram construídas em vias balastradas, também denominadas de vias convencionais ou tradicionais. Têm esta designação por serem providas maioritariamente de balastro, o elemento que lhes conferem o seu comportamento elástico. Embora hoje em dia, já existam soluções mais viáveis, como a via não balastrada, que apresenta uma maior durabilidade – período de vida útil estimado em 60 anos e menos custos em manutenção e conservação, continua-se a optar pela via balastrada. Em parte, para que o pedaço de história que ainda resta do início dos caminhos-de-ferro, não desapareça.

I.II. Enquadramento Teórico

A fim de se garantir uma boa qualidade da via, da sua fiabilidade, segurança e conforto na circulação de vias férreas é necessário conhecer-se a condição física das mesmas. Assim, são realizados alguns procedimentos técnicos através da inspecção de via, como as medições regulares de parâmetros geométricos; da condição do carril e de avaliação das camadas da infraestrutura. Estas apreciações das características das vias, indicam se é necessária a execução de limpezas, a realização de lubrificação periódica, a substituição de algum material e ou a correcção da geometria da via. (Rodrigues, 2012).

Para efetuar a inspecção de via existem vários veículos de inspecção que podem ser divididos, de um modo geral, em manuais e automáticos, e, estes últimos, em automáticos simples ou automáticos de alta velocidade.

O veículo EM 120 é um veículo de inspecção motorizado que tem a capacidade de avaliar as condições de via de forma rápida, não destrutiva e com elevada precisão, permitindo que a inspecção se efetive a uma velocidade de 120 km/h, ou seja, velocidades bastante elevadas (REFER, 2001). O emprego deste veículo permite que as condições de verificação dos parâmetros geométricos se realizem em condições quase normais em termos de cargas, uma vez que o equipamento EM 120 tem como vantagens de o seu peso e a sua velocidade serem comparativamente muito próximos dos equipamentos em utilização.

Paralelamente existe ainda outro equipamento muito importante que importa ser referido que é o radar de prospecção, o GPR (*Ground Penetrating Radar*). O GPR utiliza um método não destrutivo e rápido para avaliar as condições da subestrutura ferroviária (Fontul, 2012). Este equipamento tem sido usado para trabalhos de inspecção, com cada vez mais regularidade, em caminhos-de-ferro.

Em geral, este radar funciona com o apoio em duas antenas fixas, em que uma é a transmissora e outra a receptora. A primeira envia ondas electromagnéticas para o solo, e quando um alvo é detectado, parte da onda é reflectida; em seguida, a antena receptora, localizada perto da transmissora, capta a energia reflectida e dá a informação de detecção (Jol, 2008). A distância para o objecto detectado é determinada pelo intervalo de tempo entre o momento da emissão do pulso e do momento da recepção de seu eco.

Por fim interessa realçar que a manutenção é realizada com base na geometria da via, sem ter em conta as causas de degradação, apenas o seu efeito. Pelas razões referidas, torna-se importante utilizar todos os métodos de inspecção não destrutivos de forma a diagnosticar tempestivamente a necessidade de intervenção e a profundidade desta intervenção.

I.III. Objectivos e Metodologia

O desenrolar deste trabalho teve como objectivo principal, tal como o nome indica, contribuir para uma melhor manutenção da via-férrea através do desenvolvimento de uma metodologia para uma gestão da manutenção de infraestruturas ferroviárias mais simples e prática. Esta abordagem é baseada num diagnóstico mais preciso da condição da mesma utilizando uma combinação de métodos não destrutivos de inspecção, nomeadamente a medição da geometria da via e a avaliação das condições das camadas com o radar de prospecção.

Assim, pretende-se desenvolver, analisando um caso de estudo numa via em serviço e com o auxílio de medições realizadas em laboratório, uma metodologia, adaptada às condições portuguesas, para estudar o problema da degradação de via através da identificação da contaminação do balastro e a respectiva reabilitação, promovendo a adopção de medidas de manutenção adequadas ao estado real da via.

Desenvolveram-se estudos “in situ” e em laboratório relativos, por um lado, à identificação e à análise do estado da geometria da via e dos materiais constituintes da mesma e, por outro lado, à avaliação das constantes dieléctricas. Para este efeito, recorreu-se a métodos de análise e comparação das duas tipologias de casos de estudo para que estes pudessem ser confrontados.

Dos estudos efectuados resultam novos conhecimentos que poderão continuar a ser aplicados nas manutenções, conservações e intervenções de infraestruturas ferroviárias.

I.IV. Estrutura de Conteúdo

O presente trabalho consta de sete capítulos, apresentando-se seguidamente uma descrição sumária de cada deles.

No primeiro capítulo é introduzido o tema do trabalho com um enquadramento, sendo explicitados os seus objectivos e metodologia e, descritos os conteúdos de cada capítulo.

No segundo capítulo descrevem-se os principais parâmetros geométricos da via a ter em conta na sua manutenção e conservação e, igualmente, na inspecção da mesma.

O terceiro capítulo, é o capítulo referente à inspecção de via e aborda os principais tipos de inspecção que se realizam e os equipamentos utilizados para o efeito, estando divididos em equipamentos manuais, automáticos ou de alta velocidade. Neste capítulo há um maior enfoque no Veículo de Inspecção – EM 120 e no Radar de Prospeção – GPR, sendo estes essenciais no decorrer do trabalho.

No quarto capítulo é relatada uma breve história do aparecimento dos caminhos-de-ferro em Portugal e da sua evolução para o enquadramento da via balastrada. É apresentada uma comparação entre a via balastrada e a via não balastrada e, ainda, são referidas as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas. De seguida, são enumeradas as características e funções da camada de balastro para a análise dos principais mecanismos de degradação do balastro. Neste mesmo capítulo são, também, abordados os principais parâmetros de avaliação do nível de contaminação do balastro.

No quinto capítulo apresentam-se os casos de estudo realizados em laboratório. Em primeiro lugar são caracterizados os materiais utilizados, mais propriamente o solo argiloso utilizado para a simulação da contaminação do balastro, apresenta-se a caracterização do balastro contaminado e do balastro muito contaminado. Neste mesmo capítulo é apresentada uma breve descrição da realização dos vários casos de estudo em laboratório e a análise dos resultados, em termos de valores de constantes dielétricas. Para a avaliação destas constantes dielétricas, anteriormente mencionadas, foi utilizado o GPR, e, assim serão descritos os diferentes sistemas de antenas utilizados, as suas funções e características. São ainda apresentadas as reflexões do GPR para

alguns casos de estudo bem como, a relação entre as constantes dieléctricas entre casos de estudo.

No sexto capítulo, na sequência do capítulo anterior, são mencionados os casos de estudo realizados numa via em serviço. Inicialmente é apresentada uma breve caracterização da mesma onde são classificados os vários troços que compõe esta via, como por exemplo, as renovações já impostas, indicando as respectivas décadas e as taxas percentuais da degradação. Posteriormente são enunciados pequenos trechos da via, nomeadamente onde são propostas, pela entidade, as renovações de desguarnecimento, onde é feita uma análise que compara o estado de geometria de via e outros dados da EM 120 com os dados do radar de prospecção. No fim deste capítulo é exposta uma análise que compara os diferentes casos de estudo consoante intervenção ou não intervenção por meio das reflexões retiradas em cada zona e do cálculo das constantes dieléctricas a partir do programa de *RailwayDoctor*.

No sétimo e último capítulo é elaborado um breve resumo do trabalho, acompanhado das principais análises que o trabalho procurou desenvolver e apresentam-se as perspectivas relativas à investigação futura nesta área.

II. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE VIA

I.I. Introdução

A superestrutura de uma via-férrea é a parte que recebe directamente os impactos das cargas transportadas, cujos principais elementos constitutivos são: os carris, as fixações, as travessas e as camadas de balastro e de sub-balastro. Estes estão sujeitos às acções de degradação provocada pelas características de circulação dos veículos (frequência de utilização, velocidade dos veículos, volume de carga transportada), pela deterioração por ataque do meio ambiente, pela estabilidade da infraestrutura ou, ainda, pelo facto da via estar apoiada sobre uma camada de balastro que se encontra sujeita a deslocamentos em todas as direcções (Leonardo, 2006).

Para a inspecção das vias férreas é necessário, dependendo de alguns critérios, tais como, o nível de utilização da mesma, existir actividades de manutenção e de conservação, em períodos de tempo predefinidos. O controlo de qualidade realizado através das inspecções, visa avaliar a conformidade entre as especificações técnicas fixadas em normas com as actividades de manutenção e conservação.

Nessas especificações constam os parâmetros de via, ou seja, as definições e tolerâncias a respeitar. Através da utilização de equipamentos de avaliação de via é possível determinar esses parâmetros e compará-los com as normas. Assim, podemos verificar se existem anomalias, determinar as suas causas e realizar a reparação (Rodrigues, 2012).

Embora os parâmetros da via sejam definidos e medidos separadamente, a sua influência é conjunta, ou seja, o incumprimento de um pode potenciar a avaria de outro.

Neste capítulo irão ser descritos os parâmetros geométricos de via mais importantes, tais como:

- Bitola;
- Escala/Sobreelevação;
- Nivelamento;
 - Nivelamento Longitudinal

- Nivelamento Transversal
- Empeno
- Alinhamento.

I.II.Bitola

A bitola de uma via-férrea é a distância definida entre as faces interiores das cabeças de dois carris. Esta distância é medida 15mm abaixo do plano de rolamento e em esquadria com eles, tal como ilustra a Figura II.1.

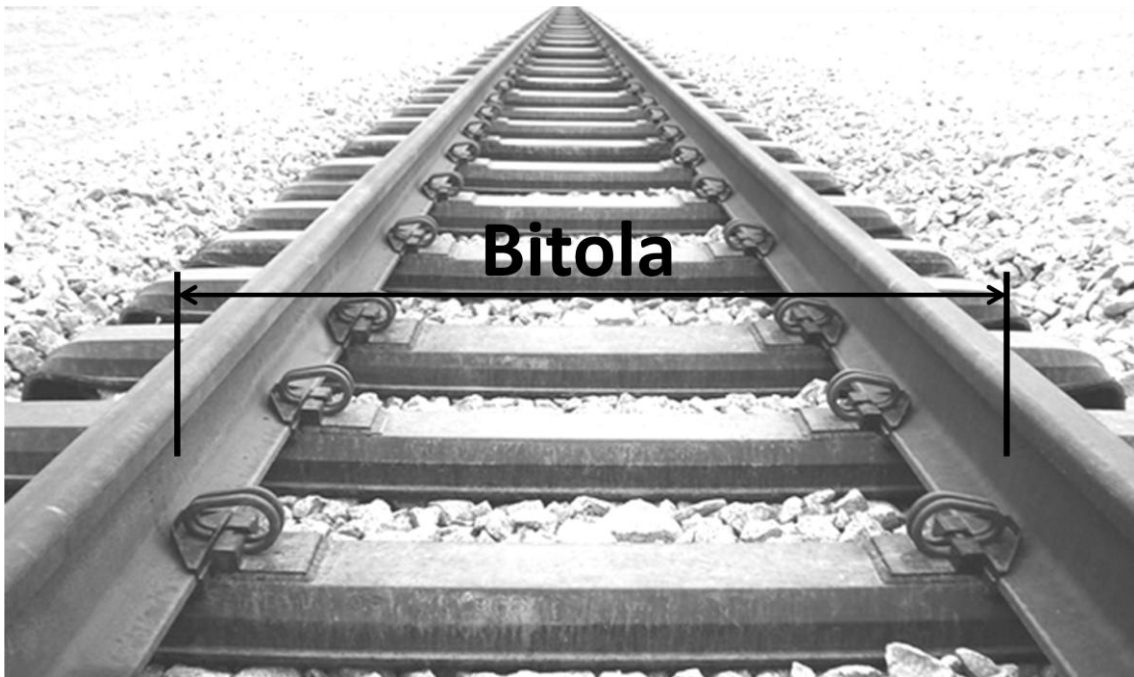


Figura II.1. Ilustração esquemática de uma Bitola (adaptado de Revista Logística, 2015)

II.I.i. Classificações de Linhas

Em Portugal, são classificadas, consoante o valor da bitola, as seguintes linhas férreas (Fernave, 2003):

- Linhas de via normal: a bitola de via é de 1435mm;

- Linhas de via larga: a bitola da via é superior à via normal, por exemplo de 1668mm;
- Linhas de via estreita: a bitola é inferior à via normal, por exemplo 1000mm.

A bitola é um indicador de qualidade de construção e do estado da conservação da via, já que o não cumprimento dos requisitos mínimos poderá levar a situações de descarrilamento. Quando este parâmetro não se apresenta em conformidade com as normas traduz o reflexo do desgaste e degradação dos materiais ou a presença de anomalias noutros parâmetros (Fernave, 2003).

Como se pode prever, o defeito da bitola aumenta o desgaste das cabeças dos carris e dos rodados das composições. Assim, este pode ser avaliado sob os seguintes aspectos:

- Alargamento de Bitola

Nesta avaliação verifica-se o limite máximo admissível para o valor da bitola. Se o valor medido é superior ao estabelecido, então a linha está com alargamento como se pode verificar na Figura II.2. Ilustração esquemática de um Alargamento de Bitola (Silva, 2006).

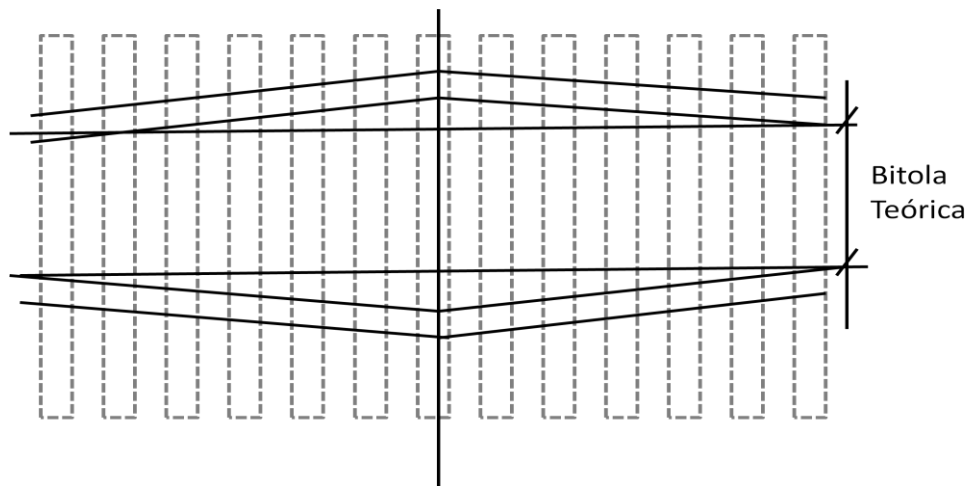


Figura II.2. Ilustração esquemática de um Alargamento de Bitola

- Estreitamento de Bitola

Nesta avaliação verifica-se o limite mínimo admissível para o valor da bitola. Se o valor medido é inferior ao estabelecido, então a linha está com estreitamento como demonstra a Figura II.3 (Silva, 2006).

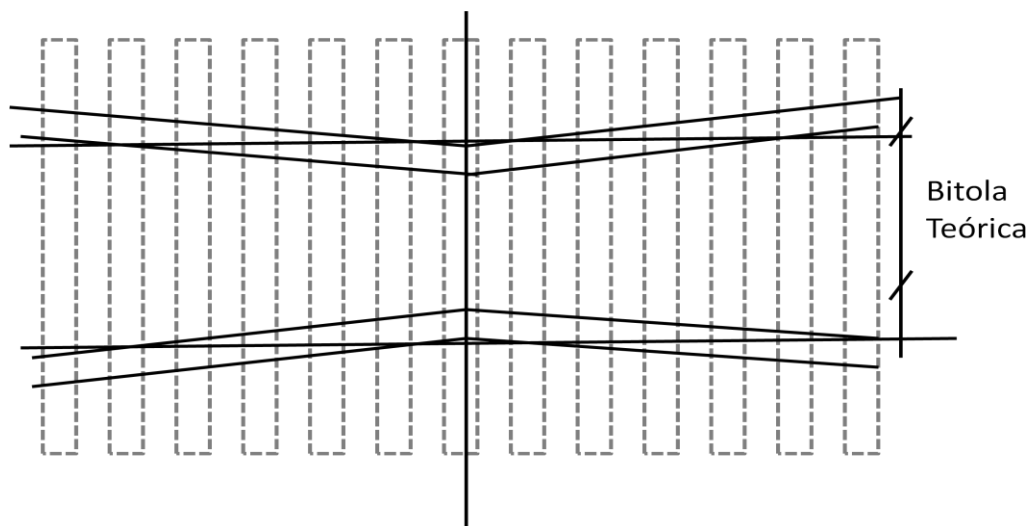


Figura II.3. Ilustração esquemática de um Estreitamento de Bitola

II.II. Escala/Sobreelevação

A escala ou a sobrelevação da via-férrea é a diferença máxima na altura entre o carril exterior e o interior, medida ao centro da cabeça do carril, tal como se pode ver na

Figura II.4.

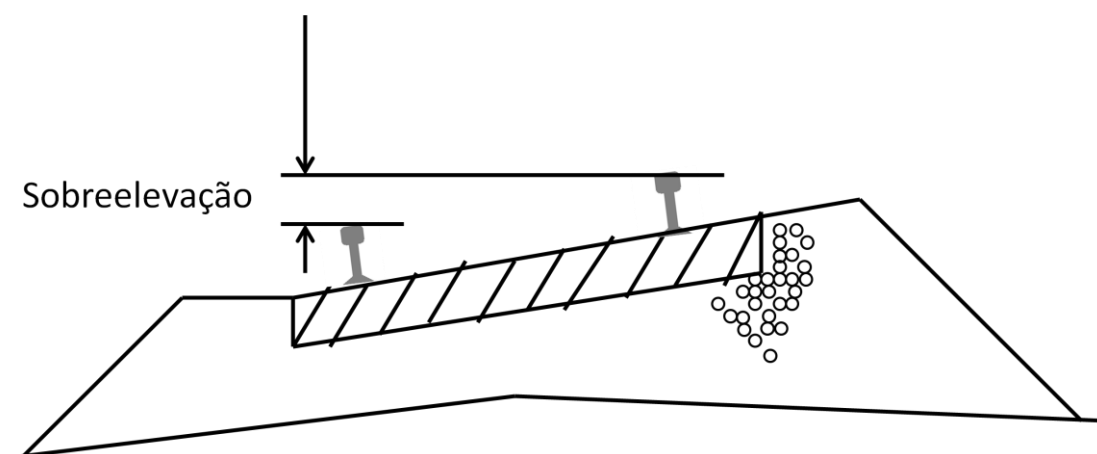


Figura II.4. Ilustração esquemática de uma Sobreelevação/Escala

Em curva, as composições ferroviárias sofrem um impulso denominado de força centrífuga para o exterior da mesma. A escala ou sobrelevação tem como objetivo contrariar os esforços transversais resultantes da força centrífuga (Fernave, 2003).

II.III. Nivelamento

O nivelamento de uma via-férrea é o parâmetro responsável pela regularidade do apoio dos rodados em movimento e assegura a estabilidade vertical dos veículos. Na via-férrea podem surgir assentamentos devido à pressão exercida pela passagem de composições com grandes cargas a elevadas velocidades. Este tipo de patologia gera irregularidades no apoio dos rodados e oscilações verticais bruscas no material circulante. Os assentamentos podem desenvolver-se simultaneamente nas duas filas ou alternadamente numa e noutra.

Os defeitos de nivelamento podem ocorrer logo a seguir à construção ou renovação da via nos seguintes pontos fracos (Fernave, 2003):

- Zonas de plataforma de má qualidade;
- Zonas com drenagem deficiente;
- Sobre aterro construído recentemente;
- Zonas de balastro contaminado (colmatado) ou rolado;
- Pontos de descontinuidade no apoio das travessas ou dos carris (passagens de nível, pontões, encontros de obras de arte, etc.);
- Travessas mal apoiadas;
- Soldaduras e juntas de carris.

Os defeitos de nivelamento podem ser caracterizados por três parâmetros, dependendo da direcção e extensão, enumerados e descritos de seguida:

- Nivelamento longitudinal;
- Nivelamento transversal;
- Empeno.

II.III.i. Nivelamento Longitudinal

O defeito de nivelamento longitudinal é o desnível entre a rasante de dois pontos altos e um ponto baixo situado entre os dois, ou seja, caracterizada pela formação de pontos altos e baixos ao longo da via, numa das filas, ou nas duas (Fernave, 2003), como se pode ver na Figura II.5.

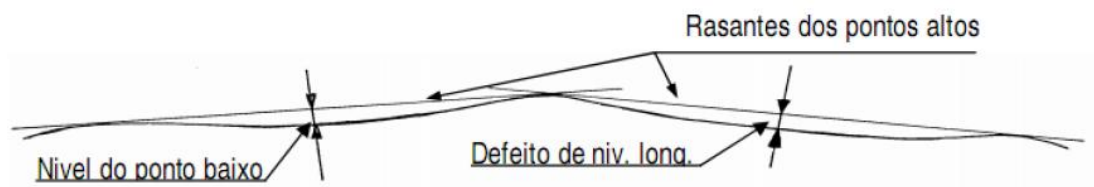


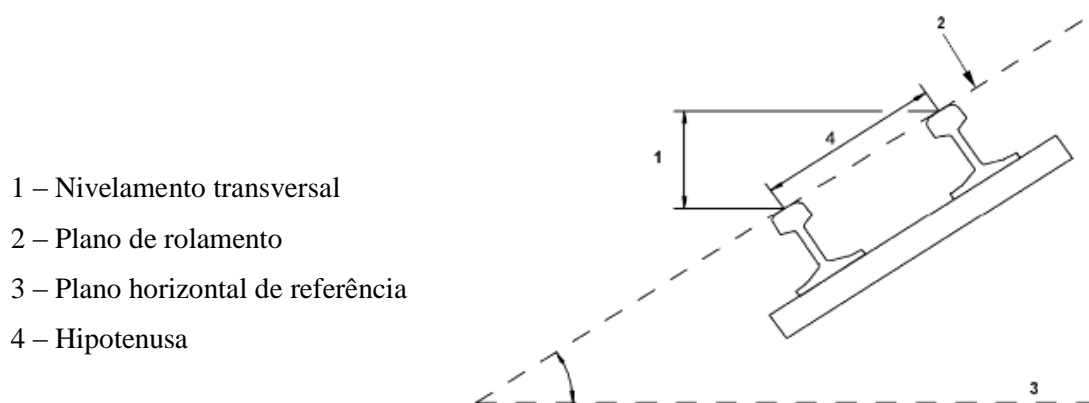
Figura II.5. Ilustração esquemática do defeito de Nivelamento Longitudinal (Fernave, 2003)

O desvio longitudinal é responsável pelo movimento de galope dos veículos ferroviários circulantes na via desnivelada.

II.III.ii. Nivelamento Transversal

O defeito de nivelamento transversal é a diferença em altura da mesa de rolamento de cada carril obtida pelo ângulo entre o plano de rolamento e o plano horizontal de referência. Corresponde à dimensão do cateto vertical de um triângulo retângulo que tem como hipotenusa um valor de referência representativo da distância entre os eixos dos carris.

Este parâmetro geométrico é o mais importante aquando da inspeção da via-férrea. É a partir dele que se analisa se a via está nivelada ou se eventualmente, necessita de reposição de balastro. Esta reposição de balastro é inadequada porque pode influenciar em muito, e negativamente, a crescente contaminação de balastro. Na Figura II.6 encontra-se uma representação esquemática do defeito de nivelamento transversal.



- 1 – Nivelamento transversal
- 2 – Plano de rolamento
- 3 – Plano horizontal de referência
- 4 – Hipotenusa

Figura II.6. Ilustração esquemática do defeito de nivelamento transversal (Baldeiras, 2013)

II.III.iii. Empeno

A avaria de empeno caracteriza-se por alterações bruscas de nivelamento transversal as quais se traduzem em irregularidades no apoio dos rodados.

Considerando quatro pontos sobre a base de rolamento dos carris, dois sobre cada carril, formando um retângulo, define-se como empeno, a distância vertical de um dos pontos ao plano formado pelos outros três. Dito de outra forma, o valor do empeno corresponde à diferença de dois nivelamentos transversais numa determinada base de medição (Baldeiras, 2013).

Este parâmetro representado na Figura II.7, é considerado extremamente importante no que diz respeito à segurança dado que em certas circunstâncias pode ser perigoso, podendo provocar o descarrilamento de composições.

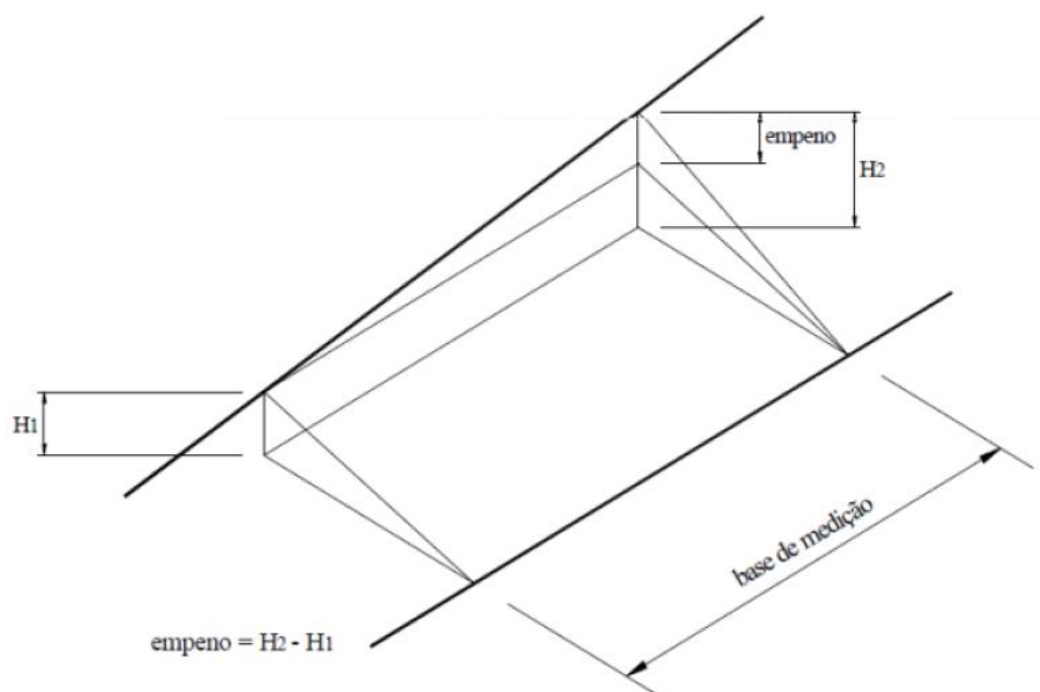


Figura II.7. Ilustração esquemática de um Empeno (Pereira, 2002)

II.IV. Alinhamento

O encaminhamento das composições nas ferrovias deve-se aos carris (Figura II.8). Esse encaminhamento é feito através do contacto do verdugo do rodado com a face interior do carril, denominada face de guiamento (Fernave, 2003).

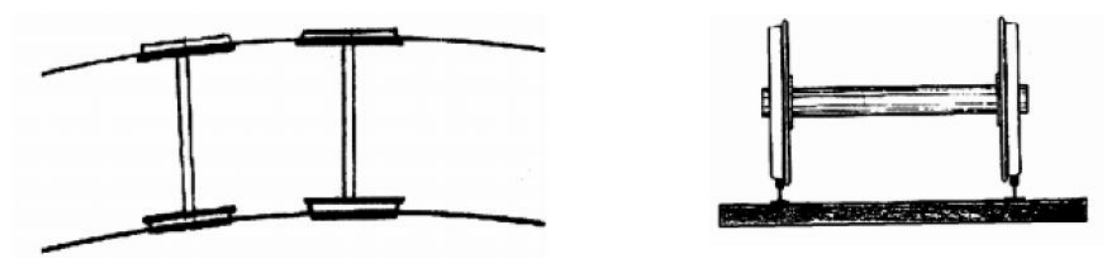


Figura II.8. Ilustração esquemática de um Alinhamento dos rodados (Fernave, 2003)

O alinhamento é o parâmetro responsável pela qualidade do guiamento dos veículos e assegura a estabilidade lateral dos mesmos. Deste modo, a existência de irregularidades no alinhamento do carril de guiamento, transmitir-se-á diretamente às composições que sobre ele circulam, causando instabilidade, em especial a velocidades elevadas. O lacete (instabilidade lateral) é provocado pelos defeitos de alinhamento. Este fenómeno provoca oscilação transversal, especialmente da locomotiva e do veículo da cauda (Rodrigues, 2012).

O alinhamento de via-férrea é obtido através de sucessivas medições na direção paralela ao plano de rolamento da posição do carril em relação a uma linha intermédia de referência, sendo esta medição efetuada para cada um dos carris em separado.

As instabilidades lateral e vertical, influenciam-se mutuamente, provocando esforços na superestrutura da via e nas suspensões dos veículos. Deste modo, a superestrutura tende a sofrer uma rápida degradação que coloca a segurança em causa (Fernave, 2003). Por todos estes motivos, o alinhamento da via é considerado um dos mais importantes parâmetros para o bom desempenho da mesma.

III. INSPECÇÃO DE VIA

III.I. Introdução

Para se garantir uma boa qualidade de via, fiabilidade, segurança e conforto na circulação de vias férreas é necessário conhecer-se a condição das mesmas. Para isso são realizados alguns procedimentos através da inspecção de via, como as medições regulares de parâmetros geométricos; da condição do carril e de avaliação das camadas da infraestrutura. Assim são avaliadas as características das vias, indicando se é necessária a substituição de algum material e/ou a correcção da geometria da via. (Rodrigues, 2012).

A tecnologia tem vindo a melhorar cada vez mais, e, por essa razão na área da inspecção geométrica de via o mesmo também se tem verificado. Os avanços mais recentes e notórios são os ensaios não destrutivos (END), sendo o seu potencial vastíssimo, atendendo a que se trata de avaliar estruturas com grande desenvolvimento linear. Estes métodos provocam pouco ou nenhum dano na estrutura aquando da sua aplicação – alguns destes simulam condições de serviço real, provocando cargas e velocidades semelhantes aos da sua utilização.

Como são métodos não invasivos podem ser realizados com a estrutura em utilização, embora a sua maior vantagem resida no facto de, em muitas circunstâncias, permitirem que os defeitos sejam detectados numa fase inicial do seu desenvolvimento. Estes métodos são também muito precisos e oferecem a possibilidade de medir vários parâmetros de via simultaneamente.

Fruto da sua simplicidade, rapidez, *know-how* e custo, os ensaios clássicos são os mais utilizados. Durante a operação é usual medir a geometria da via e proceder a inspeções periódicas ao nível da superestrutura. Os ensaios envolvendo a subestrutura, são realizados apenas em situações excepcionais, após se verificar a existência de anomalias (Pedrosa, 2009).

Contudo, no âmbito da engenharia ferroviária, nota-se uma preocupação crescente em proceder também ao acompanhamento regular da subestrutura, de forma a prever eventuais defeitos que possam pôr em causa a regular exploração da estrutura e cujo desenvolvimento pode conduzir a trabalhos de manutenção de grande vulto, longos e dispendiosos (Pedrosa, 2009).

Depois de realizadas as devidas inspecções periódicas com os métodos mais indicados - simples, manuais ou complexos (descritos de seguida) - para cada infraestrutura ferroviária, é necessário fazer-se o diagnóstico das mesmas. Este diagnóstico tem como objectivo a prevenção de falhas nos equipamentos ou em sistemas, através da inspecção e medição de diversos parâmetros da infraestrutura, da consulta do histórico de inspecções e da permissão da operação contínua dos equipamentos durante o maior intervalo de tempo possível, garantido sempre a segurança das circulações.

Os benefícios deste diagnóstico são o aumento da disponibilidade total das infraestruturas; a diminuição dos custos gerais com a manutenção e o incremento da eficiência operacional da empresa (Baldeiras, 2008).

Após o diagnóstico elabora-se um plano de manutenção da infraestrutura ferroviária de acordo com o orçamento disponível, baseado num conhecimento rigoroso, do estado da infraestrutura, do histórico de intervenções e das cargas acumuladas. A manutenção tem como objectivo manter, com custos otimizados, a infraestrutura ferroviária em segurança e proporcionar conforto aos passageiros, mantendo o nível de serviço.

O custo da infraestrutura, o seu comportamento esperado, bem como as consequências de um comportamento anormal, justificam plenamente a existência de um programa de inspecções e diagnóstico como suporte ao processo de decisão relativamente ao momento ideal e, como extensão dos trabalhos de manutenção ou mesmo como renovação (Baldeiras, 2008).

III.II. Tipos de Inspeção de Via

Na inspeção ferroviária existem várias técnicas alternativas usadas regularmente. As mais simples são as análises visuais, denominadas de inspecções a pé e servem para detectar defeitos nos elementos de via, tais como, nos materiais, nos equipamentos instalados e nos sistemas de drenagem.

Outro método de inspeção ferroviária inclui os instrumentos manuais. Em norma, é utilizado nas inspecções realizadas a pé e servem para se ter uma melhor precisão e controlo dos defeitos que

se observam. Neste método são utilizados instrumentos de ultrassom como o auscultador da geometria da via e o auscultador ultrassónico dos carris.

Existem ainda outros métodos mais complexos, onde se utilizam veículos motorizados, para a medição mais precisa de deformações na via, que analisam o comportamento da superestrutura aquando da passagem de cargas a velocidades reais (Fontul, 2011). Uma vantagem importante da utilização desses veículos é o facto de aplicar uma carga semelhante à do material circulante.

Estas tecnologias mais complexas compreendem métodos de inspecção eletromagnética, medição com laser, radares de prospecção para a inspecção do balastro e sub-balastro, métodos para avaliar anomalias que se geram no contacto roda-carril e técnicas de ultrassons para inspecionar a estrutura interna do carril.

III.III. Veículos de Inspeção de Via

Como anteriormente referido existem vários tipos de equipamento de inspecção de via que se distinguem em equipamentos portáteis, tais como, o visor e mira para medição do nivelamento longitudinal, o equipamento básico de medição do alinhamento, o *MiniProf Rail*, o *TecnoRail*, o *RailMonitor*, o *Rectiway* que mede o alinhamento e nivelamento de soldaduras aluminotérmicas, a régua de medição de bitolas e nivelamento transversal e o equipamento de medição em contínuo da bitola, nivelamento transversal e empeno (Baldeiras, 2008). Em termos de equipamentos ligeiros os mais importantes são o equipamento ligeiro de medição em contínuo da geometria de via: cordas de 5 metros e cordas de 10 metros, o KRAB, o *LaiserRail* e o RMF. O equipamento *KrautKramer USM25 “Scooter”*, mais conhecido como ultrassom, pode ser um equipamento ligeiro ou agregado a um veículo.

III.III.i. Equipamentos Manuais

KRAB – auscultador de geometria de via

O KRAB é um equipamento ligeiro de inspecção de via-férrea e foi projectado para complementar os equipamentos em veículos maiores e mais sofisticados. Este equipamento,

representado na Figura III.1, é geralmente utilizado em vias secundárias, ramais ou linhas de metro. Permite medir todos os parâmetros geométricos de via (bitola, alinhamento, nivelamento longitudinal e transversal e empeno) e está preparado para medir em linhas de bitola 1000mm, 1435mm e 1668mm.



Figura III.1. KRAB – Auscultador de geometria de via (Somague, 2015)

O veículo de 36 kg é movido por um operador que pode empurrar ou puxar o equipamento ao longo da via. A velocidade de medição está dependente da velocidade de andamento do operador e em média estima-se que seja de 7 km/h.

O equipamento dispõe de um computador de bordo, com um GPS integrado, que recolhe os dados e regista as medições em intervalos de 0,25m.

RMF – auscultador de geometria de via e desgaste ondulatório

O RMF, apresentado na Figura III.2, é um equipamento leve e de fácil manipulação que regista e armazena os parâmetros de via e o desgaste ondulatório dos carris a cada 2mm, à sua passagem. Além destes dois componentes regista-se ainda a quilometragem percorrida.

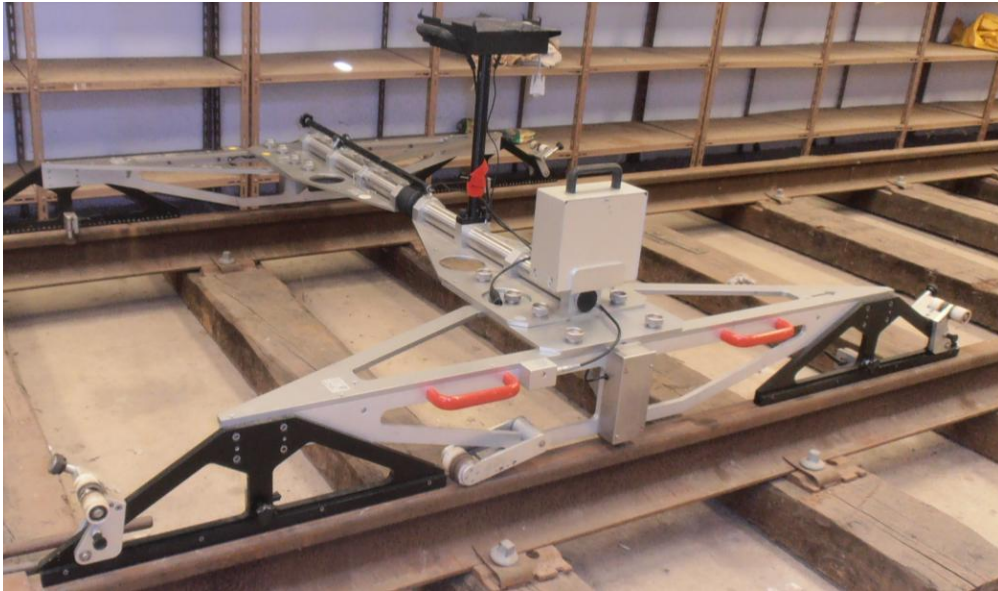


Figura III.2. RMF – auscultador de geometria de via e desgaste ondulatório (REFER, 2011)

Este equipamento é empurrado manualmente ao longo da linha, dotado de dois sistemas de roldanas que rolam sobre cada carril e de sensores analógicos com precisão 1/100mm que controlam as oscilações da superfície enviando os dados para um computador de bordo que efetua a descodificação das informações analógicas para o formato digital (Leal, 2008).

Após o armazenamento dos dados este aparelho regista um gráfico onde em ordenadas se encontram as variações do comprimento de onda do desgaste ondulatório dos carris e em abcissas se encontra a quilometragem. Os carris consoante forem o carril direito ou o carril esquerdo, apresentam diferentes cores de linhas.

Ultrassom – auscultador ultrassónico dos carris

O objectivo deste equipamento é a avaliação das condições mecânicas do carril, detectando sinais de fadiga e fissuras internas, através da emissão de ultrassons na superfície do carril (Leal, 2008).

Este aparelho pode ser manual ou transportado como atrelado num veículo. Como exemplo, em termos de equipamento pesado podemos observar a Figura III.3, cujos componentes são montados sobre uma estrutura semelhante à do KRAB e que inspeciona os carris continuamente

até a uma velocidade de 40 km/h. Por outro lado, como exemplo de um equipamento manual podemos observar a Figura III.4.



Figura III.3. Veículo de inspeção de via através de ultrassons (Pethoplan gmbh, 2015)



Figura III.4. Computador de bordo do *KrautKramer USM25* (SNDE, 2015)

***LaiserRail* – medição do perfil transversal do carril**

O *LaiserRail*, equipamento representado na Figura III.5, é um aparelho que monitoriza o desgaste dos carris com grande precisão através de um sistema a laser que faz a leitura do perfil, em alinhamento recto ou em curva (Brochado *et al*, 2007).

A medição é obtida fazendo incidir um raio laser no carril, refletindo o seu perfil num painel luminoso, que mostra o desenho do perfil desgastado sobre o perfil novo, fazendo a comparação entre ambos e, fornecendo dados como o desgaste sofrido e a perda da área da cabeça do carril (Leal, 2008).

O processo de medição é bastante simples, o aparelho é movido até ao local onde se pretende realizar a inspeção e é colocado sobre um dos carris, apoiando-se no outro através de uma régua extensora.

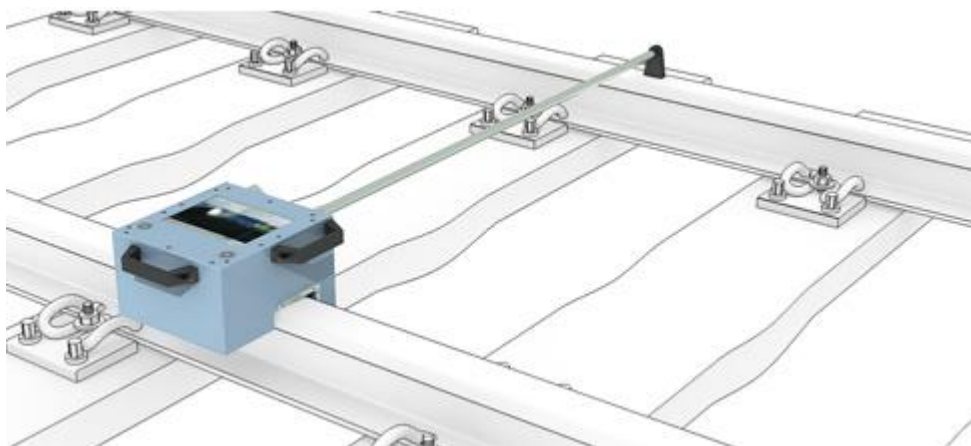


Figura III.5. *LaiserRail* (Mermecgroup, 2015)

Todos os dados são reunidos de forma digital e registados numa base de dados, a qual permite efetuar comparações com medições anteriores, de forma a criar um acompanhamento do desgaste do perfil (Leal, 2008).

O programa sobrepõe as medições e compara-as com as dimensões de um carril novo. Fornece diretamente informações tais como o valor da perda percentual da cabeça do carril, com a precisão de décimas de milímetro. Posteriormente é ligado a um computador, onde é possível sobrepor a imagem do perfil do carril medido com uma imagem correspondente a um carril novo como se pode observar na Figura III.6. Em Portugal, este equipamento é mais conhecido por perfilómetro ou perfilógrafo.

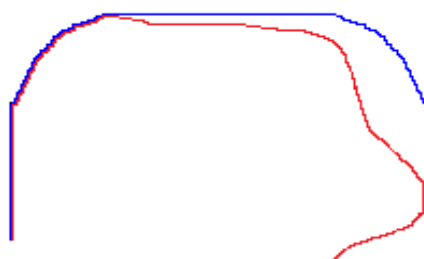


Figura III.6. Sobreposição do perfil do carril medido (linha vermelha) e novo (linha azul)

MiniProfRail

O *MiniProfRail* é um equipamento leve, fácil e prático para a monitorização da via. O *MiniProfRail* é uma ajuda única para o transporte ferroviário, pois o cálculo instantâneo e preciso dos parâmetros de desgaste permite otimizar a sua manutenção.



Figura III.7. *MiniProfRail* (Dispostel, 2015)

O *MiniProfRail* é ligado magneticamente à parte superior da cabeça do carril, tal como se observa na Figura III.7 utilizando o carril oposto como referência através uma haste telescópica. Pode ser montado um dispositivo perpendicular na haste telescópica para garantir um alinhamento correto com o carril. Na Figura III.8 pode observar-se como o *MiniProfRail* analisa alguns dos parâmetros geométricos de via, tais como, o desgaste da cabeça de carril e bitola, e ainda como mede o AMV.

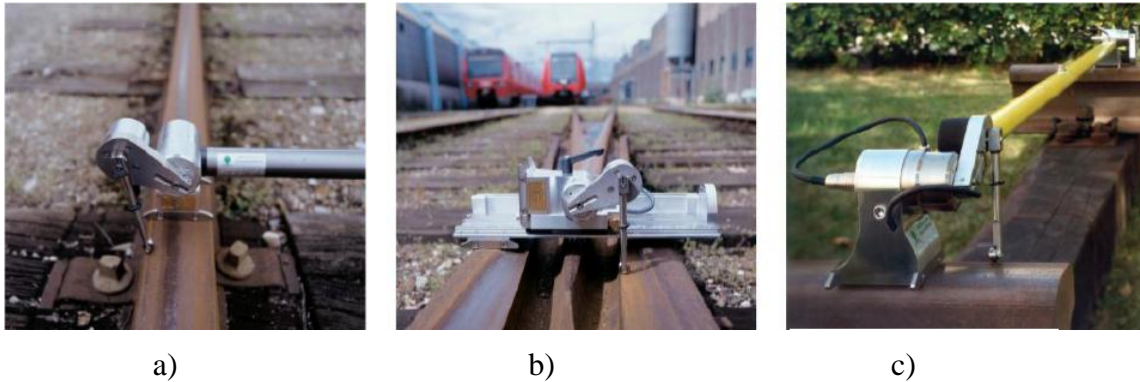


Figura III.8. *MiniProfRail* - Medição dos parâmetros geométricos: a) Desgaste da cabeça do carril; b) Medição de AMV; c) Medição de Bitola. (Greenwood, 2012)

III.III.ii. Equipamentos Automáticos

Os veículos de inspeção de via automáticos podem ser divididos em:

- Automáticos;

Ultrassom

O equipamento de Ultrassom que faz a auscultação ultrassónica dos carris, como apresentado anteriormente, pode também ser um veículo de inspeção automático.

- Automáticos de Alta Velocidade.

EM 120

Este veículo de inspeção de via, pela importância que tem para o presente trabalho, irá ser descrito mais à frente com maior pormenor.

Iris 320

O equipamento Iris 320, representado na Figura III.9, surgiu de um antigo comboio TGV modificado e operado pela SNCF Internacional. Este veículo de inspecção ferroviária de nova geração oferece sistemas de medição digitalizada, rede, tecnologia de informação e instalações flexíveis para executar a produção de dados, resultante da fusão entre inovação e manutenção ferroviária.

Sendo um antigo comboio TGV, este pode circular a 320 Km/h, de onde resulta o seu nome e, é composto por 10 carruagens, o que proporciona 160 metros de comprimento. Este comboio monitoriza principalmente o conjunto da rede LGV de alta velocidade francês a cada 15 dias.



Figura III.9. Iris 320 durante uma medição numa linha de alta velocidade (Foeillet, 2008)

III.IV. EM 120

O veículo EM 120, representado na Figura III.10, é um veículo de inspeção motorizado que tem a capacidade de avaliar as condições de via de forma rápida, não destrutiva e com elevada precisão, permitindo a sua inspeção a uma velocidade de 120 km/h, ou seja, velocidades bastante elevadas (REFER, 2001).



Figura III.10. Veículo de inspeção geométrica de via da REFER - EM 120 (Baldeiras, 2008)

O EM 120 tem vários sistemas de inspeção instalados, tais como (REFER, 2001):

- Sistema de geometria de via;
- Sistema de perfil transversal do carril;
- Sistema de perfil transversal de via;
- Sistema de geometria de catenária;
- Sistema de avaliação das camadas de infraestrutura;
- Sistema de desgaste ondulatório do carril;
- Sistema de videografia;
- Sistema de GPR.

Ao longo do tempo, este equipamento foi sofrendo alterações, sendo que os sistemas de inspecção presentes não são os mesmos aquando da chegada do mesmo. Serão então descritos os sistemas de inspecção mais importantes instalados no EM 120.

Para a análise dos dados medidos, todos os parâmetros são registrados num ficheiro que apresenta as medições de 25 em 25 cm. Posteriormente é calculado o desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento longitudinal, de 200 em 200 metros, para efeitos de avaliação da qualidade da via e programação do ataque mecânico pesado – AMP (Fontul, 2013).

III.IV.i. Sistema de Inspeção de Geometria de Via

O sistema de inspecção de geometria de via é feito sem contacto, através de um sistema inercial, constituído pelos seguintes equipamentos, representados na Figura III.11 (REFER, 2001):



Figura III.11. Localização do equipamento de análise de geometria de via (REFER, 2001)

- Receptor de GPS: indica a posição geográfica em que o veículo se encontra. Essa informação serve para dar a referência inicial e para aferir as medições efectuadas pela caixa inercial;
- Caixa inercial (IMU – *Inertial Measuring Unit*): é constituído por 3 acelerómetros, que medem acelerações (transformadas em deslocamentos após dupla integração) segundo 3

eixos que formam 90° entre si, e 3 giroscópios que medem as variações angulares em torno desses mesmos eixos. Assim, permite medir: alinhamento, nivelamento longitudinal e nivelamento transversal;

- Encoder: é um sistema de medição de óptica calibrado e indica a distância percorrida pelo veículo através da consideração do número de rotações e do perímetro de um dos rodados;
- OGMS (*Optical Gage Measuring System*): equipamento laser / óptico de medição da bitola. Mede a distância que vai desde a projecção do centro do eixo do bogie traseiro sobre o plano onde a bitola é medida a cada um dos carris. Ou seja, mede o deslocamento de cada carril ao centro do IMU, prevendo, quando combinado com os dados de posicionamento, a localização de cada carril. Este sistema está integrado com o IMU na definição dos alinhamentos e fornece a posição do ponto do carril onde a bitola é medida.
- A medição da geometria de via através do conjunto de sistemas enunciados anteriormente permite a medição rigorosa e fiável da via sob condições de carga, ou seja, condições que simulam as solicitações reais que ocorrem sobre a via em condições normais de exploração (Bento, 2011).

Os dados recolhidos são armazenados e tratados em computadores e unidades de controlo dos sistemas de inspecção instalados no veículo EM 120, como os representados na Figura III.12.



Figura III.12. Computadores e Unidades de Controlo no equipamento EM 120 (REFER, 2008)

Por fim, são gerados gráficos de acordo com a quilometragem medida pelo Encoder, em que constam os seguintes parâmetros geométricos:

- Nivelamento Longitudinal Esquerdo;
- Nivelamento Longitudinal Direito;
- Empeno;
- Bitola;
- Nivelamento Transversal;
- Alinhamento Esquerdo;
- Alinhamento Direito.

Como exemplo de um destes gráficos gerados apresenta-se a Figura III.13.

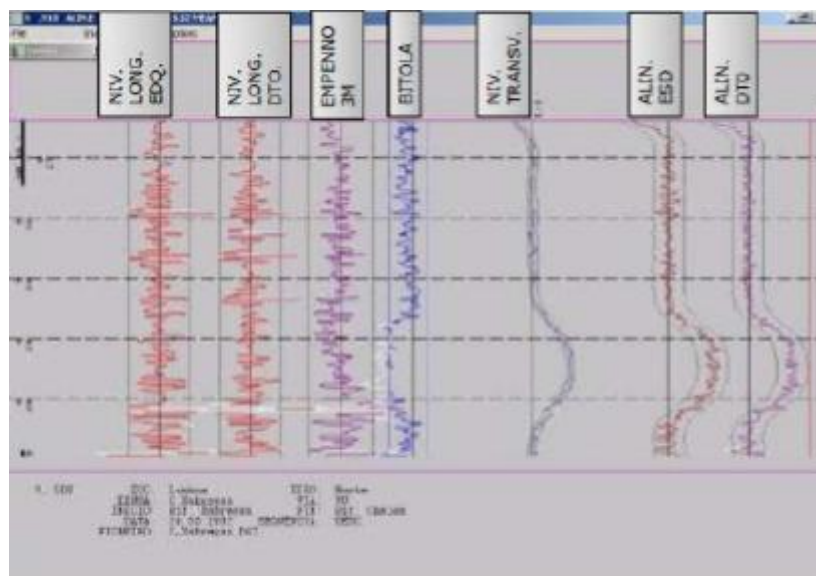


Figura III.13. Gráfico dos parâmetros geométricos (Fontul, 2013)

No lado esquerdo da figura estão representados os seguintes dados: a localização da medição através do ponto quilométrico (Pk), a velocidade de circulação recomendada, bem como os eventos da via como as passagens de nível (PN), estações, aparelhos de mudança de via (AMV), aparelhos de dilatação (AD). Em rodapé é identificado o troço de via e a data da realização da medição e o ficheiro de gravação (REFER, 2001).

A medição dos parâmetros geométricos é realizada com o espaçamento de vinte e cinco centímetros podendo ser ajustado consoante a necessidade. Aquando da medição é necessário assegurar uma velocidade mínima de 18 km/h para que não ocorram problemas de medição, devido ao funcionamento dos algoritmos da caixa inercial.

Além dos gráficos são também elaborados 3 relatórios, sendo o primeiro o que descreve os defeitos de geometria de via, ou seja, indica os defeitos encontrados para as normas já definidas, denominado de Relatório dos Defeitos de Geometria de Via. De seguida, apresenta-se uma imagem das colunas deste relatório, em que consta a seguinte informação:

- Via analisada;
- Pk inicial do defeito;
- Pk final do defeito;
- Extensão do defeito (Pk final - Pk inicial);
- Tipo de defeito;
- Amplitude máxima do defeito (mm);
- Pk onde foi detetada a amplitude máxima;
- Classe analisada;
- Classe onde o defeito era permitido;
- Subclasse analisada.

O segundo relatório é designado de Relatório Sumário, na Figura III.14 está representado um exemplo, onde constam o número e extensões de defeitos existentes de cada parâmetro nas subclasses pretendidas, que representam (REFER, 2001):

- Tolerâncias de receção de linhas novas ou renovadas;
- Tolerâncias de conservação de via;
- Tolerâncias de segurança.

SOMATÓRIO--	DE--	--PARA--	CLASSE=III	EXTENS' NÚMERO	EXTENS' NÚMERO	EXTENS' NÚMERO
TRACK	KM M	KM M	EXTE			
VA	2, 0	3, 0	1000	A	B	C
	nlv. Long. Esq.			513'28	204'27	66'13
	nlv. Long. Dir.			537'31	183'23	51'12
	Empeno 3m			430'42	21'6	0'0
	Excesso Bitola			230'11	126'13	56'7
	Aperto Bitola			323'27	181'22	27'5
	Nivelam. Transversal			326'37	57'16	16'6
	Alinhamento Esquerdo			228'18	23'4	11'2
	Alinhamento Direito			199'22	36'6	11'4

Figura III.14. Relatório Sumário (REFER, 2001)

O último relatório é o Relatório de Índices de Qualidade, onde na Figura III.15 está um exemplo do mesmo.

ADA2 REPORT										PAGE	2
0, 500		ZOC	Lisboa		EIXO	Lisboa/Setúbal M					
		LINHA	L. Alentejo		TRACK	VA					
		início:	Barreiro		Fim:	Pinhal Novo					
		DATA:	10.09.2001		SEQUÊNCIA:	ASC.					
		FILENAME	BarrPNov_VA.DAT		CLASSE:	III					
-----*											
LOCATION				*	ADA2					*	
-----*											
TRACK	KILOMETER		MAX	TAMP	LINE	TQI	GAGE	CLN	*		
	DE	PARA	KM/H	(00)	(00)	(00)	(00)	(00)	*		
-----*											
VA	0, 560	0, 750<	80	* -113	-58	-158	-67	-81	*		
VA	0, 750	1, 0<	80	* -109	-54	-148	-61	-84	*		
VA	1, 0	1, 123<	80	* -127	-72	-181	-72	-98	*		
VA	1, 123	1, 250<	80	* -105	-59	-148	-54	-79	*		
VA	1, 250	1, 500	80	* -121	-63	-168	-65	-91	*		
VA	1, 500	1, 750	80	* -133	-54	-172	-56	-102	*		
VA	1, 750	2, 0	80	* -108	-56	-149	-60	-81	*		
VA	2, 0	2, 199<	80	* -148	-76	-201	-74	-119	*		
VA	2, 199	2, 250<	100	* -176	-79	-231	-51	-131	*		
VA	2, 250	2, 391<	100	* -218	-59	-256	-56	-169	*		
VA	2, 391	2, 500<	100	* -159	-51	-192	-42	-136	*		
VA	2, 500	2, 750	100	* -229	-67	-271	-75	-191	*		

Figura III.15. Relatório de Índices de Qualidade (REFER, 2001)

O índice utilizado, TQI, é um parâmetro adimensional, calculado em troços de extensão predefinida, que representa as acelerações verticais e laterais sofridas pelo material circulante, e consequentemente transmitidas aos passageiros, provocados por defeitos na geometria de via (Baldeiras, 2008). Este índice serve então para classificar qualitativamente os troços de via. O critério utilizado é o da Tabela III.1.

Tabela III.1. Relação entre TQI e os níveis de qualidade de geometria de via

ÍNDICE DE QUALIDADE DE VIA (TQI)	NÍVEIS DE QUALIDADE
$0 \leq \text{TQI} \leq 150$	Bom
$150 < \text{TQI} \leq 200$	Aceitável
$200 < \text{TQI} \leq 250$	Deficiente
$250 < \text{TQI}$	Mau

Para se obter o nível de qualidade, é calculado, através de índices de qualidade calculados anteriormente, um desvio padrão que faça a média dos valores num determinado troço. (Lopes, 2013).

Contudo, este índice já não é usado actualmente para a classificação qualitativa da via. Como o índice de qualidade total (TQI), é dependente da velocidade de circulação na via, se baixar essa velocidade, mesmo que a via esteja em mau estado, consegue-se ter sempre um valor de índice aceitável. A aplicação do TQI tem também a desvantagem de não ser possível indicar um problema específico existente na via.

III.IV.ii. Sistema de Inspeção do Perfil Transversal do Carril

A inspeção do perfil transversal de carril tem como principal objectivo identificar e quantificar os valores de desgaste lateral e vertical do carril, permitindo o acompanhamento da sua evolução, potenciando desta forma o planeamento da substituição ou reperfilamento do carril. (Baldeiras, 2013).

O sistema de medição do perfil transversal do carril é efectuado através de um equipamento laser/óptico de 4 em 4 metros. Com este sistema obtém-se a medição do perfil do carril desde a ligação alma/patilha até à superfície superior da cabeça. Durante a visualização da medição de cada perfil transversal é criada uma imagem de um perfil tipo ao qual é comparada e fornecida a área em mm^2 e a percentagem de cabeça de carril perdida. Na Figura III.16 encontra-se um exemplo da medição do perfil transversal do carril.

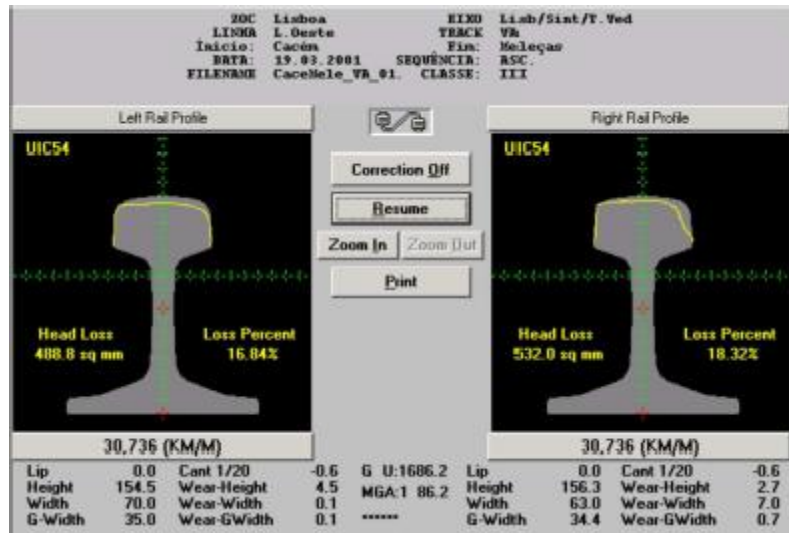


Figura III.16. Perfil Transversal do Carril (Baldeiras, 2008)

No caso da medição do perfil do carril existe também a possibilidade de visualizar num gráfico, como no caso dos parâmetros de geometria da via apresentados anteriormente, os parâmetros da medição do carril e as tolerâncias predefinidas. Esses parâmetros são os seguintes:

- Desgaste vertical – carril esquerdo;
- Desgaste lateral – carril esquerdo;
- Desgaste vertical – carril direito;
- Desgaste lateral – carril direito.

III.IV.iii. Sistema de Inspeção do Perfil Transversal de Via

A medição deste sistema é efectuada através de uma unidade laser/radar que emite um raio que é reflectido no objecto, como representado na Figura III.17. Posteriormente é feita a contagem de tempo entre a emissão e a captação do referido raio e conhecendo a velocidade de propagação do mesmo, é possível determinar a distância a que se encontra o objecto.

Os dados das distâncias medidas são processados em conjunto com o ângulo da unidade. A inspeção do perfil transversal da via é realizada através da medição efetuada por um sistema laser que obtém as seguintes medidas (Fontul, 2011):

- Medição do perfil do balastro;
- Medição de distâncias de obstáculos ao eixo da via e a um gabarito definido;
- Medição da altura de plataformas;
- Medição da largura da entrevia.



Figura III.17. Sistema de Laser de Medição (Baldeiras, 2008)

III.IV.iv. Equipamentos Instalados Recentemente

Este equipamento, EM 120, é ainda dotado de dois equipamentos instalados recentemente, nomeadamente, um radar de prospecção para a avaliação das camadas da infraestrutura e um equipamento de inspeção do desgaste ondulatório dos carris (Fontul, 2011). Na Figura III.18 está representado um exemplo de uma medição com o radar.

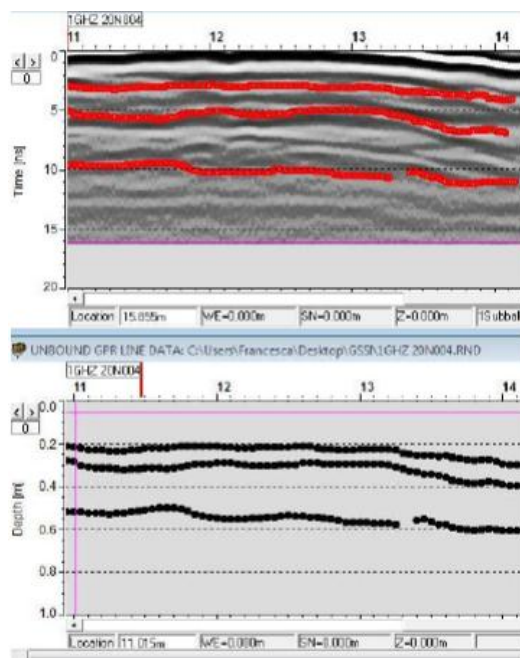


Figura III.18. Aspecto da medição com radar (Fontul, 2011)

III.IV.v. Processamento dos Dados Medidos

Posteriormente, os dados obtidos pelo equipamento serão introduzidos num programa e realizados relatórios para serem analisados por equipas de manutenção. Neste programa são identificados os pontos onde os parâmetros medidos não cumprem os limites de segurança e serão, por esta razão, identificados como pontos críticos. O equipamento deixa uma marca de cor na via, para que estes pontos sejam rapidamente identificados, estes deverão ser corrigidos de imediato, visto que o risco de descarrilamento é elevado (Leal, 2008).

A análise do estado das condições geométricas da via é a comparação entre os parâmetros medidos e os valores das tolerâncias estabelecidas em normas. Geralmente, esses dados são analisados sob a óptica da segurança e, as correções são executadas imediatamente. Contudo, podem também ser analisados sob a óptica da manutenção, o que implica uma execução programada das acções (Leal, 2008).

III.IV.vi. Vantagens de utilização do EM 120

O uso deste equipamento é cada vez mais frequente, porque tem inúmeras vantagens. Durante o processo de medição dos parâmetros geométricos não há contacto físico com a via, ou seja, não há dano nenhum para a estrutura. O EM 120 determina automaticamente todos os troços de via em que um ou mais parâmetros excedem as respectivas tolerâncias, determinando o seu comprimento, valor máximo e respectiva localização e ainda os índices de qualidade da via em tempo real, com base nas variações da aceleração, as quais são calculadas pelas flechas, considerando a velocidade máxima permitida na linha.

A faculdade da marcação física na via nos locais onde são detectados os defeitos, também é uma grande vantagem, porque será muito mais perceptível o local onde o defeito está aquando das inspecções visíveis.

A principal vantagem deste equipamento é de ser constituído por uma locomotiva ferroviária e ser um veículo automático de alta velocidade, permitindo-lhe assim, enquanto está a fazer as medições dos diversos parâmetros geométricos, poder circular à velocidade normal dos comboios e com o efeito da mesma carga que estes.

III.V. Radar de Prospeção (GPR)

III.V.i. Descrição geral

O Radar de Prospeção, “*Ground Penetrating Radar*” (GPR), é um método não destrutivo e rápido para avaliar as condições da subestrutura ferroviária (Fontul, 2012). Este equipamento tem sido usado para trabalhos de inspecção, com cada vez mais regularidade, em caminhos-de-ferro e também em estradas, pontes, aeroportos, entre outros.

O GPR contém um módulo geofísico que usa impulsos de radar para criar uma imagem radiológica da sub-superfície. Baseia-se assim, na emissão de uma radiação electromagnética, de curta duração, na banda de micro-ondas, do espectro de rádio e que, posteriormente, detecta os sinais reflectidos pelas estruturas que se encontrem sob a superfície.

As ondas electromagnéticas, ao serem emitidas para o meio, sofrerão fenómenos, tais como, propagação, transmissão, reflexão, difracção e refacção. Estes fenómenos diversos dependem dos materiais que compõem o meio, e das suas propriedades eléctricas (condutividade eléctrica, permeabilidade magnética e constante dieléctrica), bem como da existência ou não de água (Lopes, 2013).

O sistema GPR é constituído por três componentes principais: uma unidade de controlo, duas antenas (uma emissora e outra receptora) e um fornecedor de energia (ou seja, uma bateria). Analisando os seus componentes, é de notar que o facto do sistema GPR poder usar vários tipos de alimentação eléctrica, desde baterias recarregáveis, a baterias de veículos e às comuns 110/220 volt, torna-o extremamente versátil e um excelente sistema de inspecção móvel. A constituição deste equipamento está esquematicamente representada na Figura III.19.

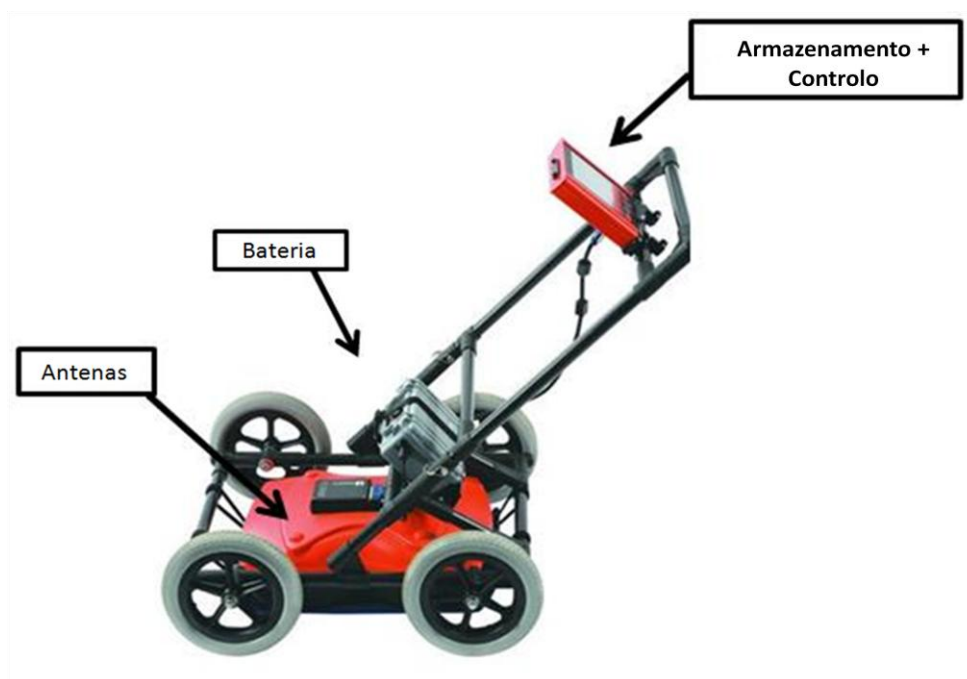


Figura III.19. Constituição de um equipamento de GPR (Adaptado de Geo.ua, 2015)

A unidade de controlo, representada na Figura III.20, contém os componentes electrónicos que criam a onda de energia radar que a antena direcciona para o meio a ensaiar. Posteriormente, o computador embutido no GPR usa a SSD/HDD deste para armazenar a informação para uma análise *à posteriori*. Alguns modelos fazem uso de um computador portátil que contém *software* de controlo ligado ao GPR; este sistema permite a análise e a interpretação de dados no terreno,

sem ter de se recorrer nem a laboratório, nem a transferência de ficheiros de radar para um outro computador.



Figura III.20. Unidade de Controlo do GPR (Alphageofísica, 2015)

A antena recebe o impulso eléctrico produzido pela unidade de controlo, amplia-o e transmite para o solo ou outro alvo a uma determinada frequência, sob a forma de energia electromagnética. Quando esta encontra um objecto enterrado, ou fronteiras entre diferentes materiais que têm constantes dieléctricas diferentes, pode então ser reflectida de volta à superfície, onde a antena grava as variações no sinal de retorno.

III.V.ii. Princípios de funcionamento

Os princípios envolvidos são então muito semelhantes à sismologia, com a diferença que nas infraestruturas ferroviárias é usada a energia electromagnética, em vez de energia acústica, embora seja aplicado o mesmo método de aquisição de informação através do eco gerado pela energia aplicada.

É relevante observar que a frequência da antena é um fator que em muito afecta a profundidade de penetração e a resolução/qualidade da imagem obtida. Isto deve-se a fatores como a condutividade eléctrica do solo, a frequência do sinal e a radiação. Aumentos na condutividade eléctrica atenuam a onda electromagnética introduzida e assim, a profundidade de penetração diminui.

Antenas com altas frequências não penetram em tanta profundidade como antenas com baixas frequências. No entanto, as que têm frequências altas geralmente resultam numa resolução de melhor qualidade de imagem. Logo, a frequência de operação é sempre dependente de resolução ou de penetração.

Como exemplo prático, um GPR aplicado em solo/materiais secos ou arenosos, tais como granito ou cimento, tende a conseguir uma penetração de 15 metros, visto que estes materiais não são condutivos. Na maior parte de solos/materiais húmidos, como barro, a penetração poderá ser de apenas uns centímetros, devido à alta condutividade dos mesmos.

Uma onda electromagnética é irradiada de uma antena transmissora, atravessa o material-alvo a uma velocidade que é determinada pela permeabilidade do mesmo; a onda espalha-se e viaja até atingir um objecto que tenha propriedades eléctricas que sejam diferentes do meio em que se encontra. É então repartida pelo objecto e detectada por uma antena receptora e gravada para poder ser interpretada.

Na Figura III.21 está representado um esquema do funcionamento do GPR.

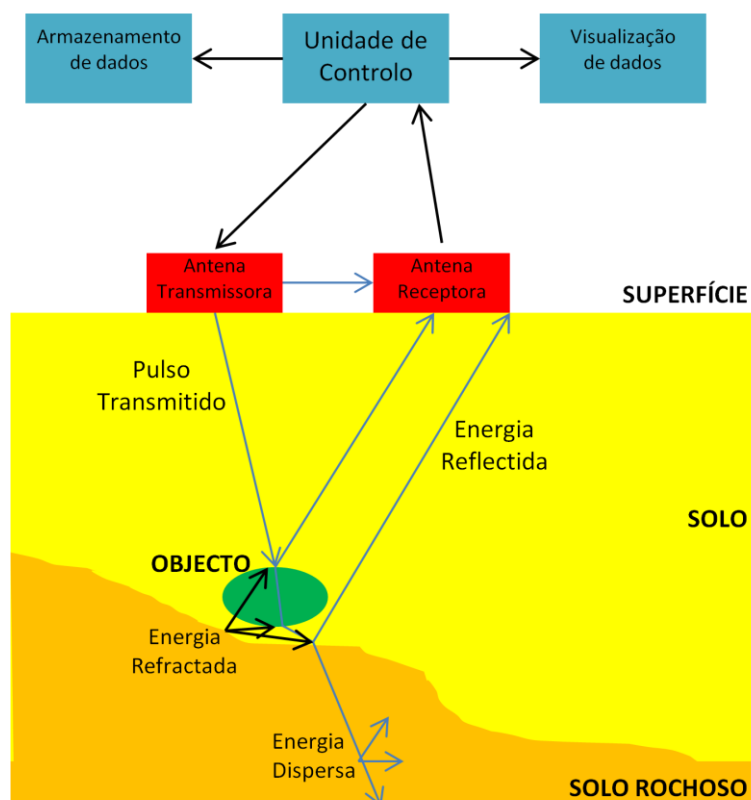


Figura III.21. Esquema de funcionamento do GPR

A grande desvantagem do uso deste equipamento é a dificuldade em detectar interfaces quando há mudanças entre dois materiais.

A condutividade eléctrica de um material define a capacidade deste para conduzir ou transmitir corrente eléctrica, sendo utilizada para especificar o carácter eléctrico de um material. É dada pela seguinte expressão (Infoescola, 2013):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{III.1.})$$

Com,

σ – Condutividade eléctrica;

ρ – Resistividade.

Sendo que todos os materiais são condutores, estes podem ser agrupados numa de três categorias:

- Condutores – nesta categoria incluem-se os materiais de condutividade elevada ($\sigma > 10^5$ mho/m), conseguindo-se um efeito de atenuação das ondas tão marcante que se consideram reflectores perfeitos;
- Isolantes ou Dieléctricos – nesta categoria estão incluídos os materiais de muito baixa condutividade ($\sigma < 10^{-7}$ mho/m), como o ar, uma vez que é desprezável a perda que neles se verifica;
- Semi-condutores – todos aqueles cuja condutividade é significativa, mas não elevada; nesta categoria inserem-se praticamente todos os materiais.

Existem três métodos de aquisição de dados de GPR: através de perfis de reflexão com afastamento constante, sondagens de velocidade ou técnicas de tomografia. É de notar que o método mais utilizado são os perfis de reflexão com afastamento constante e, como tal, será esse o presentemente descrito.

Para esta técnica, os suportes das antenas transmissora e receptora são mantidos a uma distância fixa constante. O sistema GPR é movido ao longo de perfis horizontais que também são espaçados a uma distância constante, para um melhor mapeamento tridimensional.

O resultado que se obtém é um perfil onde no eixo das abcissas estão ilustradas as distâncias percorridas pelo deslocamento das antenas, mostrando as variações das reflexões em função do tempo duplo (ou seja, o tempo de ida e de regresso do sinal) do percurso do sinal reflectido no eixo vertical.

Posteriormente ao levantamento de dados de campo, estes são analisados através de *software* específico, sendo possível realçar zonas de particular interesse, editar dados e tendo como objectivo final a apresentação da imagem processada através de um radargrama.

III.V.iii. Aplicações do GPR na inspecção de infraestruturas férreas

A utilidade do GPR em infraestruturas de caminhos-de-ferro, como equipamento de inspecção, observa-se principalmente na inspecção do balastro das linhas férreas. Um perfil em contínuo e não destrutivo do balastro e do subsolo oferece uma enorme vantagem quando comparado com o meio tradicional de obter amostras de estudo.

O meio tradicional para avaliar a qualidade do balastro investiga os locais de perfuração (realização de poços), usando intervalos de recolha de amostra, que são recolhidos a cada 50, 100 ou 200 metros. A detecção dos defeitos locais pode facilmente falhar com esta abordagem porque podem não estar distribuídos ao longo da linha férrea de acordo com leis estatísticas; podendo estar localizados longe o suficiente de um local de perfuração.

Por sua vez, como para a utilização deste método é necessário o movimento de grandes máquinas (para transporte de material de manutenção), isto provoca situações em que a inspecção tem de ser interrompida porque surgem obstáculos não previstos no balastro, como locais enlameados ou camadas muito compactas de subsolo. Assim sendo, estas paragens e interrupções provocam um aumento de custos enorme, tornando-se quase indispensável ter um bom planeamento económico.

A aplicação do GPR resolve os problemas em cima explicados. Geralmente, três perfis de GPR são recolhidos ao longo da linha férrea. O GPR permite obter informação da infraestrutura férrea até uma profundidade de cerca de 2 metros, de uma forma não destrutiva e continua ao

longo da via. Baseado nestes dados contínuos, podem ser recolhidas amostras do balastro exactamente do local onde os defeitos foram detectados pelo scan do GPR.

Assim, não só se obtém uma análise mais cuidada e menos invasiva, mas também se reduz em muito os custos económicos da inspecção.

Em quase todas as infraestruturas ferroviárias de grande extensão recorre-se a alguns eventos, como as pontes metálicas facilmente detectadas na medição com o GPR, para facilitar a localização exacta do registo ao longo da linha, nomeadamente o ajuste da posição quilométrica. De seguida, nas Figura III.22, Figura III.23, Figura III.24 e Figura III.25 são apresentadas algumas das reflexões desses eventos no programa do GPR, tais como, os Aparelhos de Mudanças de Via (AMV), as Passagens de Nível (PN), as Pontes e os Túneis.

Estes eventos são facilmente detectados nas reflexões do GPR por se notarem as irregularidades a cada um associadas, quando compradas com um perfil em contínuo da camada de balastro. Estas irregularidades estão assinaladas a vermelho nas figuras que se seguem.

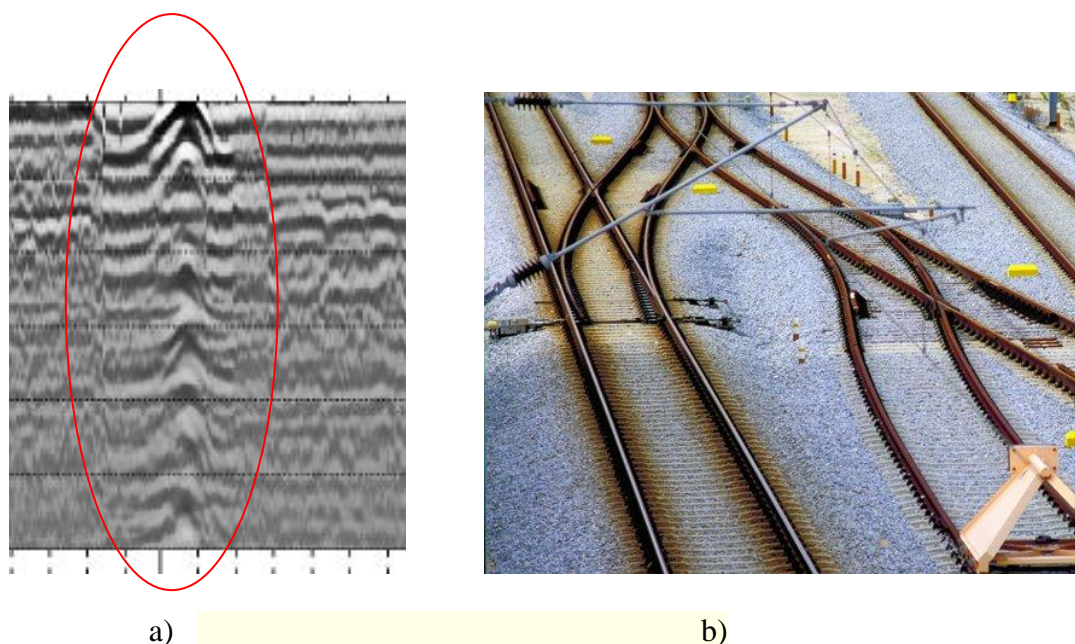


Figura III.22. Esquema de Aparelho de Mudança de Via (AMV): a) Reflexão do GPR; b) Ilustração (Infraestruturas de Portugal, 2015)

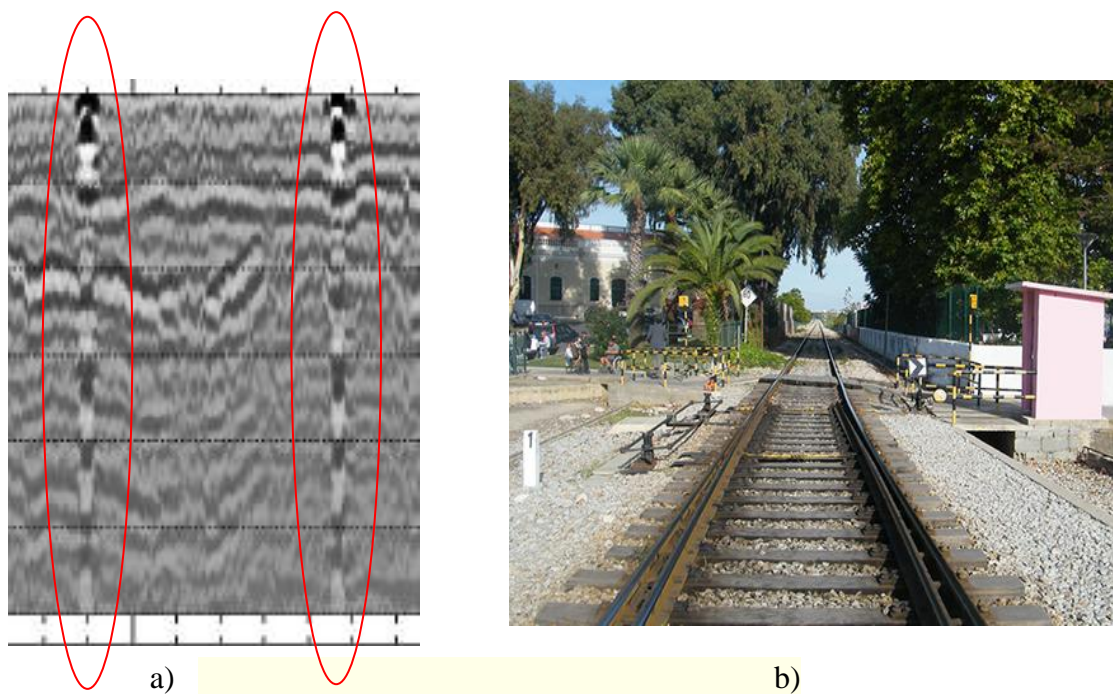


Figura III.23. Esquema de duas Passagens de Nível (PN): a) Reflexão do GPR; b) Ilustração (Infraestruturas de Portugal, 2015)

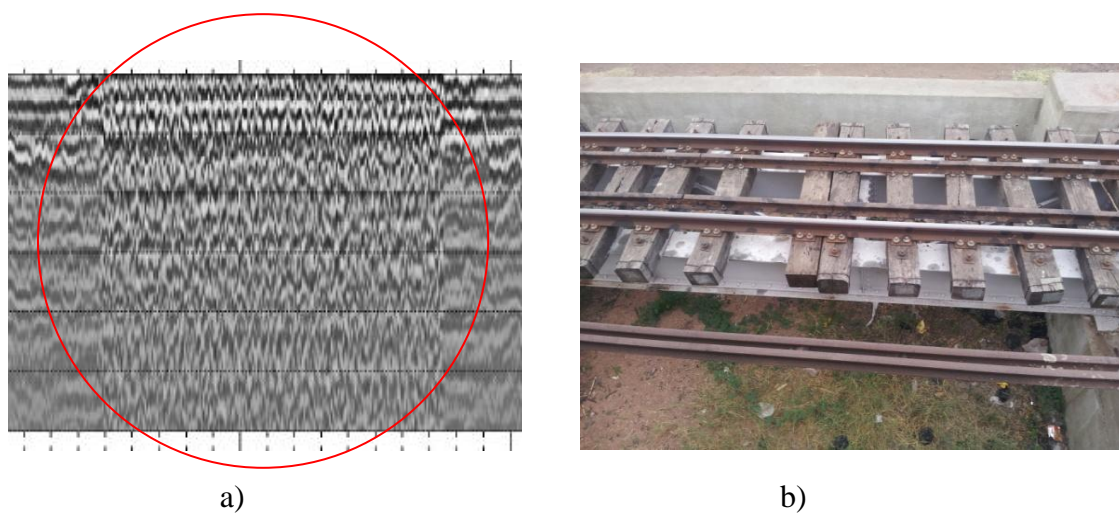


Figura III.24. Esquema de Ponte: a) Reflexão do GPR; b) Ilustração

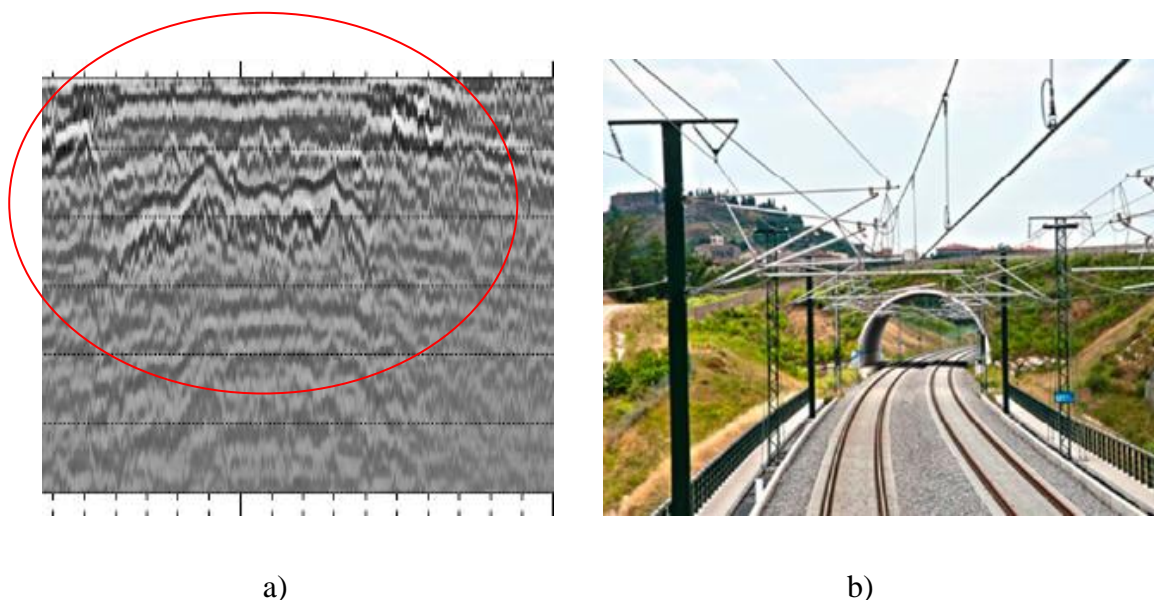


Figura III.25. Esquema de Túnel: a) Reflexão do GPR; b) Ilustração (Somague, 2015)

III.V.iv. Limitações do GPR

As limitações do GPR são óbvias em termos de hardware; materiais de alta condutividade conseguem anular quase inteiramente a viabilidade e resolução do scan. Tem também de se considerar que o desempenho do GPR também é reduzido quando o sinal, ao encontrar condições heterogéneas, isto é, solos rochosos, tende a fraccionar-se. Quando a interface entre dois materiais não é nítida, passando gradualmente de um material para outro, como é o caso do balastro contaminado com solo, o GPR tem dificuldades em detectar a interface entre camadas, não havendo uma reflexão nítida da onda. Por último, o facto de ter um gasto alto de energia, vistorias prolongadas em terreno podem tornar-se difíceis sem uma fonte permanente de alimentação eléctrica.

III.V.v. Desenvolvimentos notáveis na área

Desde que foi introduzido à comunidade científica, o GPR tem passado por inúmeras melhorias, visando sempre diminuir as suas limitações.

No que se relaciona com a história de linhas férreas, a mais notável vem na forma do 3d MKIV GeoScope GPR; anteriormente, os GPR que usavam radares baseados em impulsos precisavam de múltiplas antenas sintonizadas em diferentes frequências para capturar informação a diferentes profundidades. Usando este meio, não há forma de recolher dados directamente por baixo de carris de metais nem forma de recolher toda a informação correspondente à largura da linha férrea com uma só passagem. Para complicar mais a sua operação, depois de os dados serem recolhidos, o engenheiro tem então a difícil tarefa de “cozer” as imagens 2D para se visualizar em 3D.

Ao usar o MK IV GeoScope e a sua antena, consegue-se recolher dados correspondentes a toda a largura da linha, com uma só passagem a máxima velocidade, mantendo uma alta resolução e uma boa penetração de profundidade. A antena de MK IV usa um tipo de emissão de frequências por passos (step frequency GPR), tornando possível captar dados a baixa e a alta frequência e simultâneo, numa única passagem. Assim, consegue-se uma imagiologia superior e de uma forma mais eficiente.

Para superar o problema de não se conseguir capturar informação no subsolo directamente por baixo dos carris de aço, o GeoScope consegue ser programado para transmitir energia para o solo de uma antena que está colocada em posição adjacente ao carril e, capturar a resposta com uma outra antena colocada no outro lado do carril, permitindo assim que toda a informação seja recolhida.

IV. DEGRADAÇÃO DE VIA - BALASTRO

IV.I. Introdução

O caminho-de-ferro em Portugal foi inaugurado a 28 de Outubro de 1856, com o seu primeiro troço entre Lisboa e Carregado. Nos anos seguintes foi evoluindo ligando vários pontos do país e, até, chegou à fronteira com Espanha.

Nos inícios do Século XX, existiam, em território nacional, cerca de 2380 quilómetros de via, sendo que dois terços eram geridos por várias sociedades privadas. O transporte ferroviário era, nessa época, o mais eficaz e económico, razão pela qual o objectivo da política de transportes, era concluir o plano ferroviário, de forma a cobrir totalmente o país, ligando as regiões mais isoladas, e gerando crescimento económico.

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, aproveitou-se a reconstrução da rede ferroviária na Europa atingida pela guerra para a requalificar e modernizar, com novos traçados, material circulante e infraestruturas. Por outro lado, em Portugal registou-se o oposto, não foram reconstruídas as vias existentes uma vez que não haviam sido atingidas pela Guerra, contudo, encontravam-se obsoletas, devido ao isolamento geográfico, acentuado pela Guerra Civil Espanhola. Simultaneamente, verificou-se um abandono dos caminhos-de-ferro, acreditando-se que este meio de transporte não tinha qualquer futuro.

Contudo, nos anos seguintes, tomaram-se várias medidas, tais como, a aquisição de vagões e locomotivas; e definiu-se um plano para enfrentar a crise que se verificava neste sector.

A partir dos anos 50, a visão do transporte ferroviário alterou-se, deixando de ser um meio de transporte universal, para passar a ser uma forma de assegurar a deslocação de certos bens e passageiros para destinos específicos. A natureza dos passageiros e da carga transportada sofreu uma transformação, e registou-se um acréscimo nos passageiros de longa distância, e um aumento na tonelagem das mercadorias para destinos específicos.

Com as restrições de carga e velocidade impostas em algumas linhas do país, a situação reverteu-se novamente, e surgiram vários planos de manutenção e de reconstrução de algumas

vias, tendo sido implementada, nesta altura, a substituição das camadas do balastro, das travessas e do material circulante.

Nos dias de hoje, verifica-se uma divisão nos modos de construção das vias-férreas, onde se podem verificar novas soluções da superestrutura de via para a alta velocidade ferroviária. A via balastrada, a primeira solução pela qual se optou, é composta pela superestrutura, dividida em armamento da via (carril, fixações e travessas) e na camada de balastro; e pela infraestrutura da via dividida pela camada de sub-balastro, pela camada de coroamento e pelo solo de fundação.

A via em placa, denominada por via não balastrada, tem como constituintes a superestrutura, dividida em armamento da via (carril, fixações e travessas) e na camada de laje em betão/mistura betuminosa; e pela infraestrutura da via dividida pela camada de betão pobre, pela camada de coroamento e pelo solo de fundação.

Na Tabela IV.1 encontra-se uma breve comparação entre estas vias, a via balastrada e a via não balastrada.

A via balastrada é uma solução estrutural que, pelas suas características, possui um bom comportamento dinâmico, sob a circulação dos comboios, relativamente aos esforços provocados pelas massas suspensas (Fortunato, 2005). O balastro está directamente relacionado com a via balastrada, visto que é elemento integrante da superestrutura.

O balastro é assim um elemento fundamental na análise do comportamento da via-férrea balastrada. Este é um material que tem uma boa resistência mecânica, é limpo, contém uma superfície rugosa e é constituído por agregados de formas angulares e com dimensões entre os 25 e os 50 mm.

As principais funções do balastro são (Fontul, 2013):

- Promover uma distribuição homogénea das forças sobre a plataforma;
- Oferecer uma alta resistência longitudinal e lateral para a armadura da via;
- Garantir à via uma boa drenagem;
- Garantir a elasticidade da via com a finalidade de amortecer as cargas dinâmicas;
- Permitir uma fácil correcção da posição da via através da sua alteração (trabalhos de ataque e ripagem).

Tal como enunciado em cima, as características mecânicas dos materiais normalmente usados e a sua geometria garantem a estabilidade relativamente às acções a que a camada de balastro está sujeita, logo é pouco frequente a sua degradação devido à perda de estabilidade.

Tabela IV.1. Comparação entre a Via Balastrada e a Via Não Balastrada (adaptado de Fontul, 2013)

FACTORES	VIA BALASTRADA	VIA NÃO BALASTRADA
CUSTO DE CONSTRUÇÃO	Inferiores aos da via em laje.	Significativos, se não se implementarem processos de construção mecanizados.
PERÍODO DE VIDA ÚTIL	Necessária renovação de via, no máximo após 30 anos, dependendo do tráfego.	Valor estimado em 60 anos.
CUSTOS DE CONSERVAÇÃO, RENOVAÇÃO E REABILITAÇÃO	Trabalhos frequentes e dispendiosos; Necessidade de renovação intercalar de alguns elementos.	Drástica redução dos trabalhos de conservação; Em alguns elementos os trabalhos de renovação ou reabilitação são complexos.
DISPONIBILIDADE DE VIA	As operações de conservação e renovação implicam períodos de bloqueio de via.	Praticamente sem interrupções.
TRAÇADO	Possibilidade de correções na geometria da via com operações de ataque.	Permite menores raios, possibilitando uma melhor adaptação ao terreno natural.
RIGIDEZ DA VIA	Reduzida uniformidade da rigidez vertical de via; Contributo positivo das propriedades mecânicas do balastro.	Elevado controlo de rigidez de via; Necessidade de disposições específicas em zonas de transição.
ESTABILIDADE DE VIA	Estabilidade transversal limitada devido às propriedades mecânicas do balastro.	Elevada resistência e durabilidade, contribuindo para a conservação da qualidade geométrica de via.
RUÍDO	Boa absorção acústica.	Necessidade de disposições adicionais para atingir o mesmo nível de emissões.

Assim, as principais preocupações relativamente ao desempenho desta camada estão relacionadas com a deformabilidade e com a permeabilidade da mesma. O balastro deve providenciar um apoio resiliente para a travessa. Ao contrário, o movimento desta, provocado

pelas cargas repetidas provocará assentamentos diferenciais permanentes ao longo da via. O balastro deve também assegurar a adequada drenagem da água que cai na via. A colmatção dos vazios do balastro por partículas finas diminui a sua permeabilidade. (Fortunato, 2005).

Normalmente, o material utilizado na camada de balastro dispõe da resiliência necessária ao bom comportamento da via. Contudo, quando os vazios deste material, ao longo do tempo, são preenchidos por material mais fino e por água e considera-se que o balastro está contaminado. Esta contaminação acelera o processo de alteração do balastro, porque reduz a permeabilidade da camada e, conseqüentemente, aumenta cada vez mais a contaminação existente.

Existem vários mecanismos que conduzem à contaminação do material que constitui a camada de balastro e, posteriormente, à sua degradação, nomeadamente (Fortunato, 2005) (Fontul, 2013):

- A alteração granulométrica das partículas do balastro;
- A alteração do material da travessa (desgaste);
- A contaminação de materiais (finos) a partir das camadas granulares subjacentes quando não existem camadas protectoras ou estas estão executadas deficientemente;
- A contaminação de materiais (finos) a partir da superfície, com elementos prejudiciais como carvão, minério, areia, restos de vegetação e deterioração devido a acções climáticas (geadas, amplitudes térmicas, humidade, etc);
- A contaminação de materiais (finos) a partir da fundação;
- O tráfego devido à onda de avanço das rodas, a travessa levanta e volta a ter o impacto sobre o balastro. Os esforços dinâmicos podem sobrecarregar o balastro o que leva à rotura, ao deslizamento e à abrasão das suas partículas;
- Os trabalhos de conservação devido aos detritos da abrasão consequentes de um ataque ou de um desguarnecimento.

Nas figuras que se seguem, são apresentados esquematicamente o aspecto da estrutura de via em função dos tipos de contaminação que a mesma sofreu.

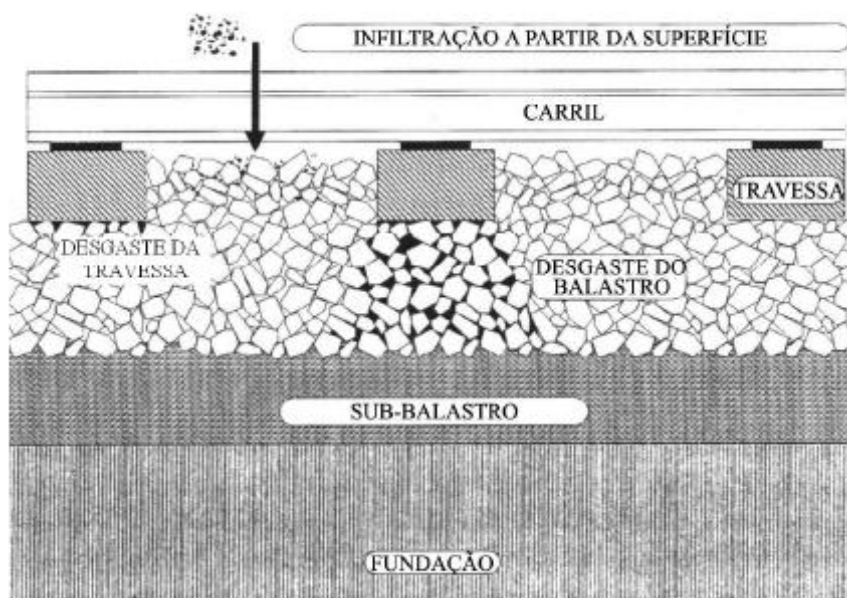


Figura IV.1. Infiltração dos materiais a partir da superfície (Fortunato, 2004)

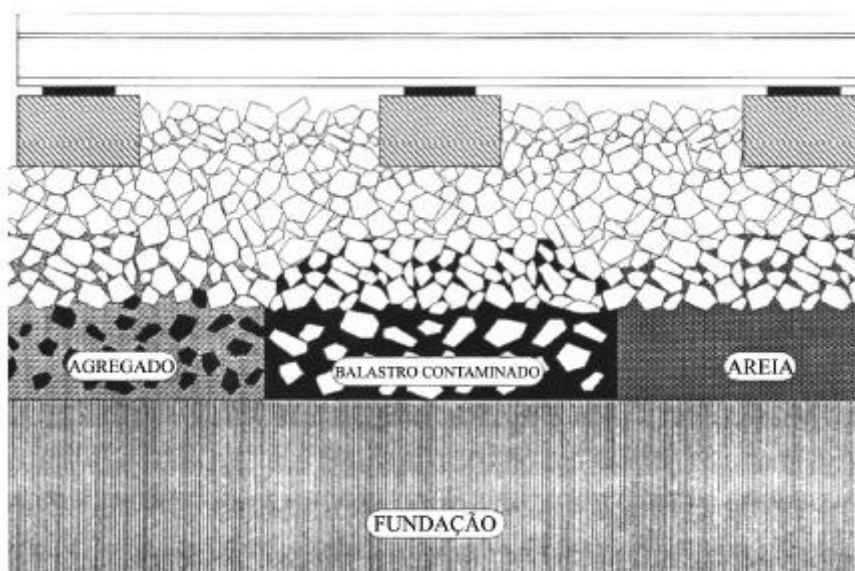


Figura IV.2. Infiltração dos materiais a partir das camadas granulares subjacentes ao balastro (Fortunato, 2004)

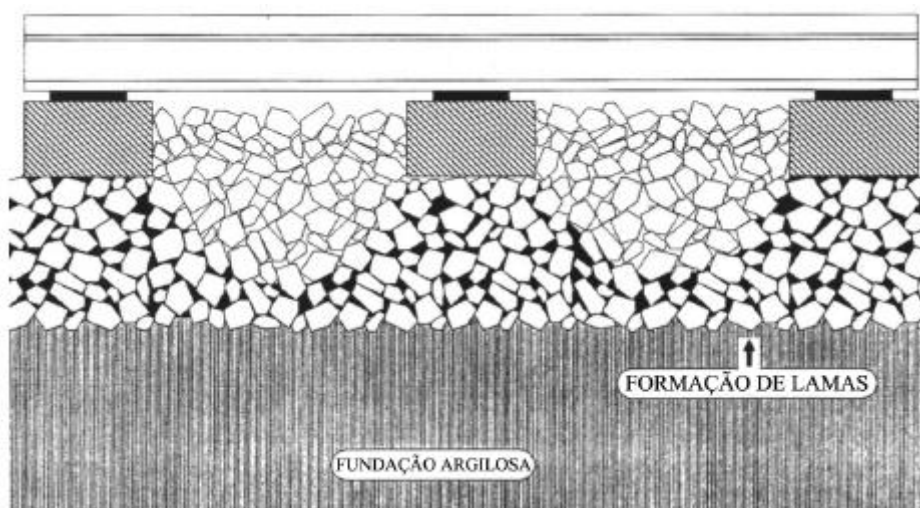


Figura IV.3. Infiltra  o de materiais a partir da funda  o (Fortunato, 2004)

Al  m de todos estes inconvenientes que agravam drasticamente a degrada  o do balastro, este tamb  m sofre em algumas circunst  ncias de uma manuten  o n  o adequada. Por vezes, quando o balastro sofre de um assentamento, a manuten  o realizada passa pela coloca  o de mais balastro nesse mesmo lugar. Consequentemente, se o problema nessa regi  o for do solo de funda  o, a coloca  o de mais material, s   vai piorar e degradar ainda mais a situa  o.

IV.II. Par  metros de Avalia  o do N  vel de Contamina  o do Balastro

IV.II.i. Introdu  o

De modo a caracterizar-se a contamina  o que o balastro sofre,    necess  rio avaliar o seu n  vel de contamina  o, atrav  s de tr  s par  metros principais. Estes par  metros s  o: o   ndice de contamina  o (FI), denominado de *“fouling index”* desenvolvido por Seling e Waters em 1994; a percentagem de contamina  o nos vazios (PVC), denominado por *“percentage void contamination”* desenvolvido por Feldman em 2002; e, mais recentemente foi proposto mais

um parâmetro, desenvolvido pelo Indraratna, o índice relativo da contaminação do balastro (R_{b-f}), “relative ballast fouling ratio”, (Indraratna et al., 2011).

IV.II.ii. Índice de Contaminação

O índice de contaminação classifica a contaminação do balastro tendo em conta a granulometria do material. Assim, é a soma da percentagem de agregados finos que passam no peneiro número 4, 4,75mm, com a percentagem dos que passam no peneiro número 200, 0,075mm. É dado pela seguinte expressão:

$$FI = P_4 + P_{200} \text{ (IV.1.)}$$

Com,

P_4 – Percentagem de agregados finos que passam no peneiro 4,75mm;

P_{200} – Percentagem de agregados finos que passam no peneiro 0,075mm.

Quanto maior o número de partículas finas, maior FI, porque, os volumes de vazios do balastro são ocupados e este terá uma fraca drenagem e uma grande capacidade resiliente.

Este parâmetro não distingue entre os vários materiais de contaminação que podem apresentar características diferentes, tais como a densidade relativa que é diferente entre um pó de carvão e uma rocha pulverizada (Chiara, 2014).

IV.II.iii. Percentagem de Contaminação nos Vazios

A percentagem de contaminação nos vazios é um parâmetro que relaciona os volumes de vazios do balastro com o volume total de material contaminado. É dado pela seguinte expressão:

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \text{ (IV.2.)}$$

Com,

V_1 – Volume de vazios entre as partículas de balastro;

V_2 – Volume total do material de contaminação (partículas que passam no peneiro 9,5mm).

Os limites destes valores estão representados na tabela seguinte:

Tabela IV.2. Categorias do Balastro Contaminado com base no PVC (Indraratna et al., 2011)

CATEGORIA	PVC (%)
Balastro Limpo	0 - 20
Balastro moderadamente contaminado	20 - 29
Balastro Contaminado	>30

Este parâmetro apresenta uma dificuldade em termos de cálculo, porque a medição do volume de vazio do balastro ocupado pelas partículas de sujidade pode levar muito tempo, dependendo da envolvente da via em que a camada de balastro se encontra. Além disso, a degradação do material contaminado não é considerado na fórmula (Chiara, 2014).

IV.II.iv. Índice Relativo da Contaminação do Balastro

O índice relativo da contaminação do balastro, é uma alternativa aos dois parâmetros anunciados anteriormente, representa a relação entre o volume de sólido das partículas de balastro, que passam no peneiro 9,5 mm e as partículas de balastro retidas num peneiro de 9,5 mm. É dado pela seguinte expressão:

$$R_{b-f} = \frac{M_f \times \left(\frac{G_{s-b}}{G_{s-f}}\right)}{M_b} \quad (\text{IV.3.})$$

Com,

M_b – Massa seca do balastro;

M_f – Massa seca do material contaminado;

G_{s-b} – Densidade específica do balastro;

G_{s-f} – Densidade específica do material contaminado.

IV.II.v. Relação entre Parâmetros

É possível também relacionar os primeiros dois parâmetros acima mencionados, R_{b-f} e PVC. Observa-se que o cálculo R_{b-f} será mais rápido do que o cálculo de PVC e o volume sólido e gravidades específicas dos agregados contaminados serão também tidos em conta. A fim de evitar uma determinação incorrecta de PVC que pode sobrestimar o nível de incrustação, Indraratna *et al* (2011) sugere que se considere o volume sólido de contaminações em vez de agregados do volume total (Chiara, 2014).

Portanto, o parâmetro PVC pode ser expresso como:

$$PVC = \frac{M_f \times \left(\frac{G_{s-b}}{G_{s-f}}\right)}{M_b} \times \frac{(1+e_f)}{e_b} \times 100 \quad (IV.4.)$$

Com,

e_b – Índice de vazios do balastro;

e_f – Índice de vazios do material contaminado.

Assim, o R_{b-f} é expresso como,

$$R_{b-f} = PVC \times \frac{e_b}{(1+e_f)} \quad (IV.5.)$$

De um modo geral, em diversas amostras, e_f , pode ter valores muito diferentes, enquanto e_b , não se altera significativamente. Quanto maior for o valor de e_f , verifica-se que a contaminação é

mais pobre e, conseqüentemente, a drenagem é melhor. Assim, R_{b-f} aumenta enquanto o PVC diminui, e isto, demonstra que R_{b-f} leva em conta os níveis de contaminação do material, em oposição com o PVC.

Os limites destes valores estão representados na Tabela IV.3:

Tabela IV.3. Categorias do balastro contaminado com base no FI e R_{b-f} (Indraratna et al., 2011)

CATEGORIA	FI (%)	R_{b-f} (%)
Balastro limpo	< 1	< 2
Balastro moderadamente limpo	1 - 10	2 - 10
Balastro moderadamente contaminado	10 - 20	10 - 20
Balastro contaminado	20 - 40	20 - 50
Balastro muito contaminado	≥ 40	≥ 50

V. CASOS DE ESTUDO EM LABORATÓRIO

V.I. Introdução

Para uma melhor abordagem da interpretação do GPR, depois de explicados os princípios de funcionamento, é necessário, explicar alguns conceitos acerca dos materiais testados com o radar de prospecção e, em particular, das propriedades das constantes dielétricas.

Neste capítulo, a avaliação das propriedades dielétricas em laboratório para os materiais de infraestruturas ferroviárias, principalmente o balastro, são apresentadas com diferentes condições, materiais de contaminação e antenas de GPR. Essa avaliação é fundamental para interpretar com confiança os dados medidos *in situ*.

As propriedades dielétricas dos materiais afectam directamente os dados de propagação do sinal de GPR, tais como, a reflexão e a resolução. Assim, é importante estudar quais os factores que influenciam as constantes dielétricas e com que magnitude, com o objectivo de melhorar a análise de dados GPR através de uma fase de interpretação apropriada.

As constantes dielétricas são muito sensíveis ao teor de água e, por esta razão, os testes GPR não são recomendáveis durante épocas com condições de chuva mais frequentes. Por outro lado, os solos têm que ser testados em condições molhadas, porque a água pode ser retida no material muitos dias, dependendo do tipo de material. Portanto, é importante que para o estudo da variação das propriedades dielétricas se estude a variação do seu teor em água (Chiara, 2014)

Além disso, vários estudos têm demonstrado uma variação das propriedades dielétricas, não só em função do teor de água, mas também por alteração da temperatura (Evans *et al.*, 2008).

A evolução das condições do balastro, também, é igualmente outro fator importante a ter em conta no estudo das infraestruturas ferroviárias, principalmente, no que diz respeito à sua contaminação e degradação. Dependendo da estrutura da via, da sua carga de utilização e do seu meio envolvente, o balastro, pode ser sujeito a muita ou pouca degradação e contaminação, normalmente devido às cargas de tráfego ou às acções de manutenção da via e a contaminação com solo, respectivamente.

Assim, para a mesma infraestrutura ferroviária é necessário estudar a evolução do valor da constante dielétrica, isto é, a sua variação ao longo do tempo para diferentes níveis de degradação e contaminação.

V.II. Caracterização dos Materiais

Para a realização do caso prático, isto é, a elaboração dos estudos em laboratório, foram utilizados vários materiais com características diferentes. Para a simulação da contaminação do balastro em laboratório foi utilizado um solo argiloso em muito semelhante ao solo existente nas vias onde não há sub-balastro e onde o balastro é colocado directamente em cima do solo de fundação.

Inicialmente, realizou-se a caracterização destes materiais com base nos ensaios de laboratório que são geralmente utilizados. Assim, caracterizaram-se o solo argiloso, o balastro contaminado, o balastro muito contaminado.

Para a caracterização desses materiais foram seguidas algumas normas. Como o balastro é um agregado para a via-férrea a norma seguida foi a NP EN 13450 de 2005, enquanto, para o solo argiloso seguiu-se a especificação do LNEC EN 1966-1967. Em seguida, são apresentadas as curvas granulométricas de cada um dos materiais.

A curva granulométrica do solo argiloso foi utilizada para outros ensaios no LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Tendo sido feita uma curva granulométrica que tivesse em conta a abertura dos peneiros aquando da sedimentação e aquando da peneiração, Figura V.2. Para este trabalho a curva granulométrica utilizada é a referente apenas à abertura dos peneiros aquando da peneiração, Figura V.1.

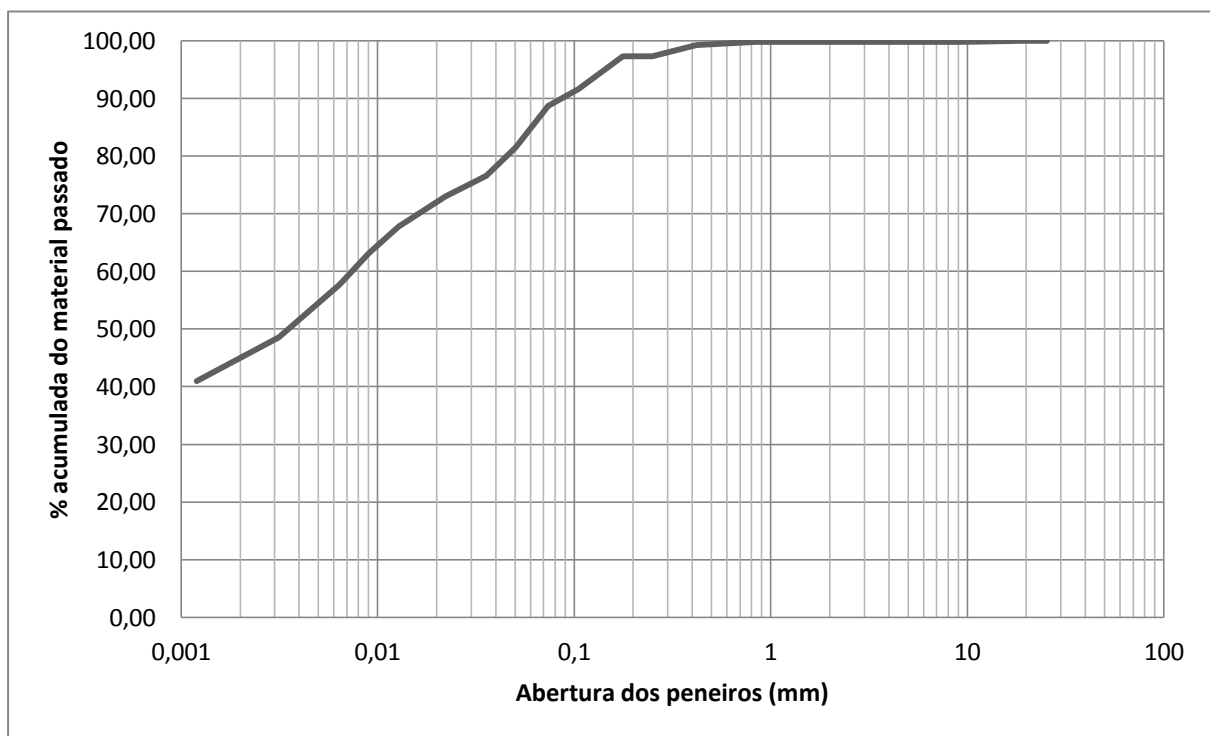


Figura V.2. Curva granulométrica do solo argiloso (sedimentação e peneiração)

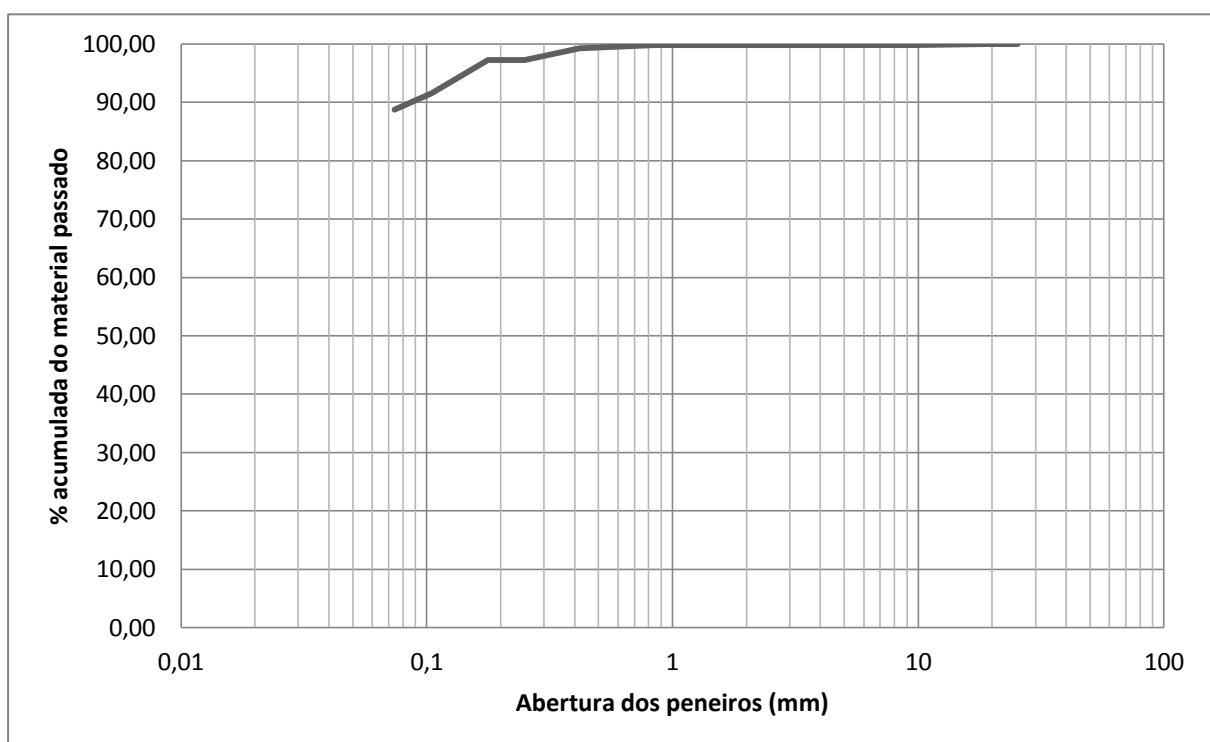


Figura V.1. Curva granulométrica do solo argiloso (peneiração)

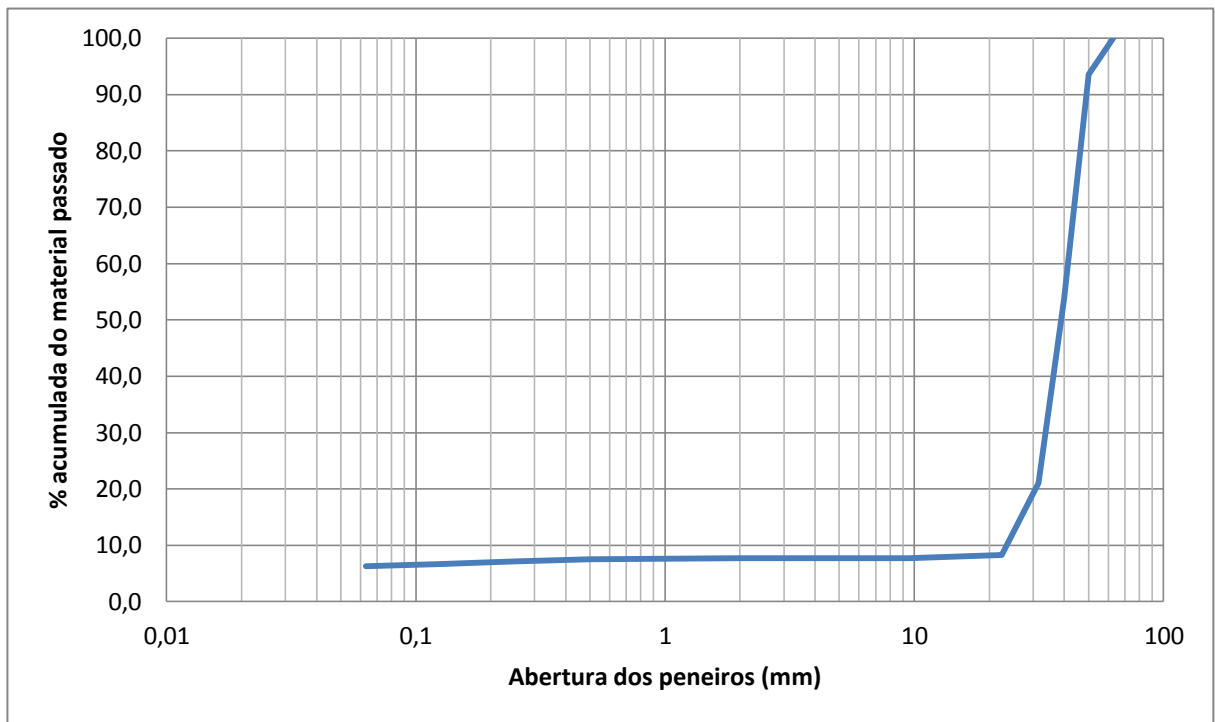


Figura V.3. Curva granulométrica do balastro contaminado

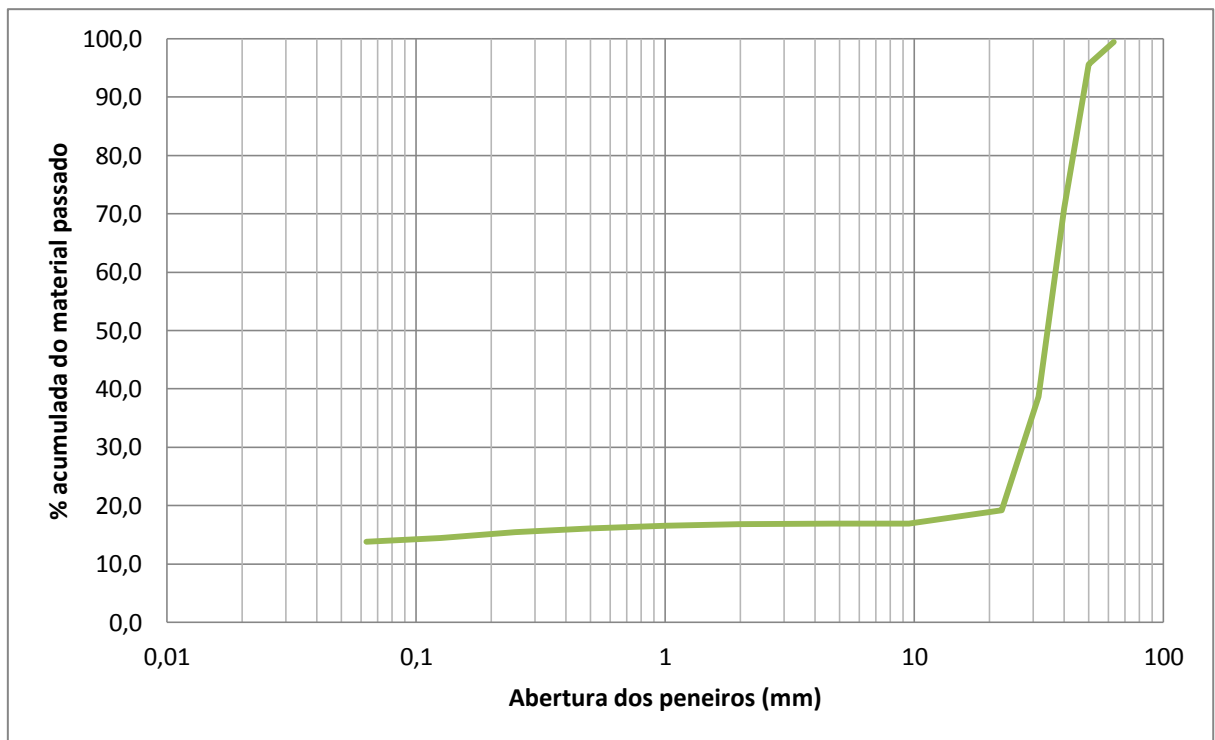


Figura V.4. Curva granulométrica do balastro muito contaminado

Comparando as duas curvas granulométricas do balastro, constatamos que na Figura V.3, a percentagem de finos que passam o peneiro de 9,5 mm é muito menor que na Figura V.4. Ou seja verifica-se os graus de contaminação nas curvas granulométricas.

Estas duas curvas foram comparadas com um fuso granulométrico, Figura V.5, obtido a partir de 114 curvas granulométricas de balastro contaminado de amostras extraídas de uma linha Portuguesa em serviço, e apresentadas num estudo anterior (Fortunato, 2005).

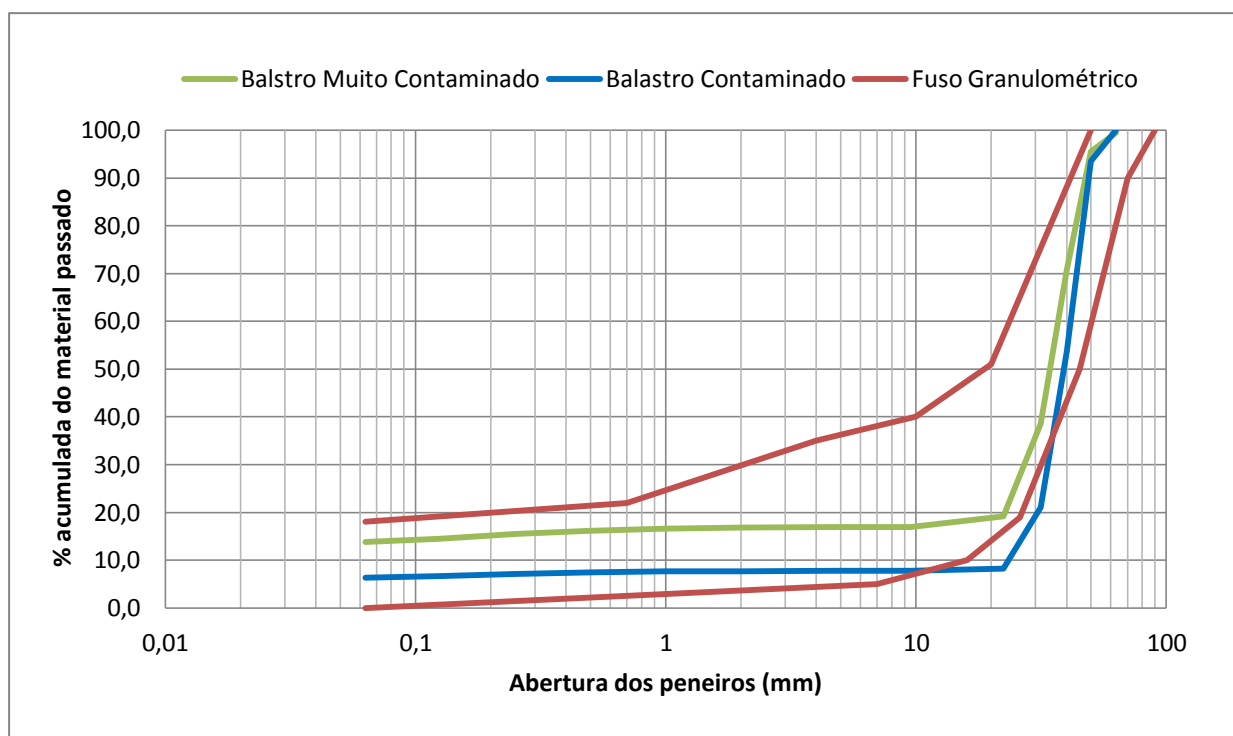


Figura V.5. Fuso granulométrico do balastro contaminado

Como se pode observar pela Figura V.5, a curva granulométrica correspondente ao balastro contaminado não está inteiramente inserida no intervalo do fuso granulométrico. Era de prever que as curvas não estivessem totalmente dentro do fuso, dado que o balastro contaminado foi composto em laboratório e no estudo anterior, das amostras recolhidas na via, tratava-se de um balastro maioritariamente calcário e não granítico.

Além das curvas granulométricas apresentadas é necessário, para o cálculo dos parâmetros do nível de contaminação do balastro, saber também a massa volúmica das partículas secas do

balastro contaminado que será de $2,64 \text{ Mg/m}^3$ e a absorção de água do mesmo, 0,35%. Em relação ao solo é necessário saber a densidade de partículas, que se utilizará $2,73 \text{ Mg/m}^3$ e o teor em água ótimo que tem o valor de 5,5%. Estes valores aqui descritos foram também calculados em laboratório.

Como indicado anteriormente, para o cálculo do índice de contaminação é necessário saber para cada balastro a percentagem de material que passa no peneiro número 4 e no peneiro número 200 (valores retirados das curvas granulométricas), e para o cálculo do índice relativo da contaminação do balastro é necessário saber a massa seca do balastro e do material de contaminação e a densidade específica do balastro e do material de contaminação. Apresentam-se na Tabela V.1, estes valores:

Tabela V.1. Índices FI e Rb-f para os dois tipos de balastro

	BALASTRO CONTAMINADO	BALASTRO MUITO CONTAMINADO
FI (%)	14,1	30,7
R_{b-f} (%)	12,2	36,1

Como se pode observar pela Tabela V.1 e comparando com os valores da Tabela IV.3. Categorias do balastro contaminado com base no FI e Rb-f (Indraratna et al., 2011), os índices do nível de contaminação do balastro correspondem aos mesmos níveis de contaminação em cada um dos casos. No caso destes serem diferentes seguiríamos-nos pelo Rb-f, porque foi o método desenvolvido mais recentemente e, como tem em conta a massa seca e a densidade dos constituintes do balastro contaminado é o mais realista.

De salientar, que as categorias que foram impostas aos balastros neste trabalho, correspondem aos nomes simplistas dos mesmos, de modo a serem diferentes um do outro e, não às categorias nacionais. O balastro contaminado corresponde, pelos índices FI e Rb-f, a um balastro moderadamente contaminado. Já o balastro muito contaminado corresponde, pelos índices FI e Rb-f, a um balastro contaminado.

V.III. Apresentação dos Casos de Estudo

Os ensaios realizados em laboratório serão descritos de seguida. Para uma melhor percepção são apresentados sumariamente, fazendo depender o tipo de balastro utilizado e o teor em água do solo de contaminação, na Tabela V.2:

Tabela V.2. Sumário dos diferentes Casos de Estudo

	BALASTRO					TEOR EM ÁGUA (%)		
	Novo	Usado	Limp	Contaminado (%)		6	10	14
				7,5	15			
CASO 1	X		X					
CASO 2		X	X					
CASO 3		X		X		X		
CASO 4		X			X	X		
CASO 5		X		X			X	X
CASO 6		X			X		X	X

Os balastros acima mencionados foram fornecidos pela REFER, sendo provenientes de uma pedreira autorizada pela mesma entidade para fornecer balastro ferroviário.

De notar que estes ensaios podem representar os vários níveis de contaminação na mesma via, como se ilustra na Figura V.6. Os casos de estudo 5 e 6 são para simular a via em condições molhadas, com teores em água mais elevados devido a chuva.

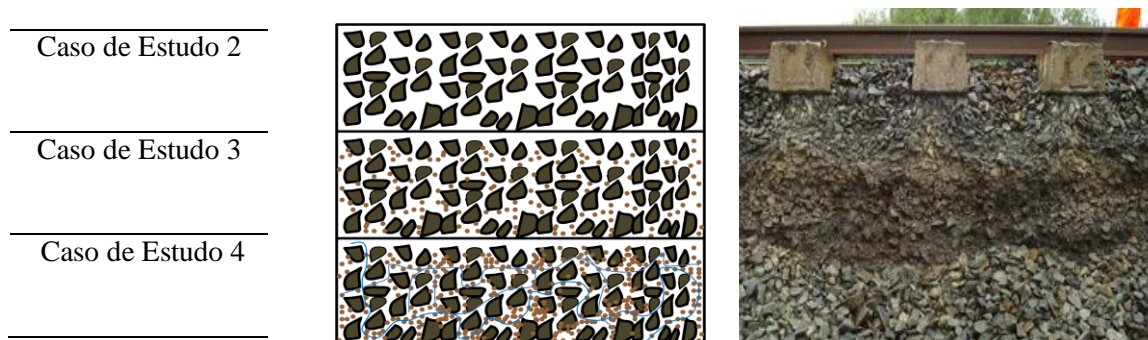


Figura V.6. Possível Modelo de Contaminação de uma Via

Inicialmente, e antes da realização dos ensaios foram efectuados alguns procedimentos para a realização das medições das constantes dielétricas. Antes da colocação do balastro forrou-se em quatro caixas brancas iguais, com as dimensões apresentadas na Figura V.7, o fundo dessas com uma folha de alumínio, como representado na Figura V.8. Este procedimento foi adoptado para todos os casos de estudo, pois, como a folha de alumínio é um reflector ideal, e sabendo a espessura das camadas do material colocado nos recipientes de ensaio, conseguiu-se saber a constante dielétrica nos diferentes testes com base na velocidade de propagação da onda do Radar de prospeção.

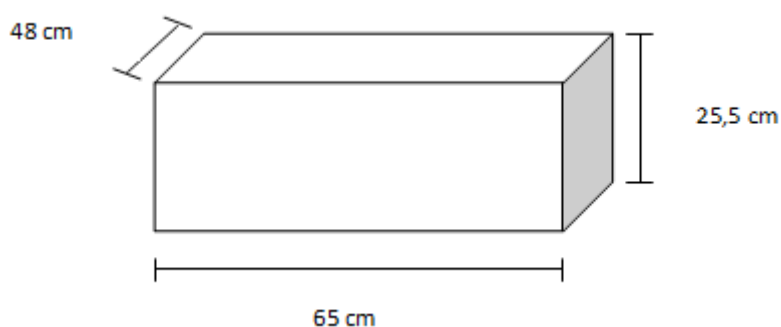


Figura V.7. Dimensões das quatro caixas

Seguidamente, pesaram-se as 4 caixas com a respectiva folha de alumínio, como demonstra a Figura V.9:

Tabela V.3. Caixas e respectivos pesos

CAIXA	PESO (Kg)
1	2,833
2	2,827
3	2,833
4	2,835

O processo realizado depois de verificados os pesos das caixas depende de cada caso de estudo.



Figura V.8. Exemplo de colocação uma folha de alumínio no fundo de uma caixa



Figura V.9. Caixa a ser pesada

V.III.i. Caso 1 – Balastro Novo Limpo

Tal como observado na Tabela V.2, o caso de estudo 1 irá apresentar o estudo de balastro novo e limpo.

Depois de pesada a caixa 1, procedeu-se à colocação de balastro novo e limpo, como representado na Figura V.10. De notar que, a primeira camada deve ser aplicada com cuidado, para que não se rompa a folha de alumínio. De seguida, pesou-se a caixa 1 (peso da caixa + alumínio + balastro) e obteve-se 82kg.

Para a compactação do balastro limpo foi utilizado um compactador pouco potente, porque embora houvesse a necessidade de o vibrar, teve de ser com cuidado para que não ocorresse a desagregação do balastro (aumento da quantidade de finos – material de contaminação - e alteração do índice de contaminação). O compactador usado foi um Vibro-Verken, com uma frequência de 2850 Kg/min e de 57 Kg (com a placa), durante dois minutos.

Colocou-se posteriormente uma fita de medição na borda da caixa para que os pontos medidos com as antenas fossem sempre os mesmos. Dentro da mesma caixa tomaram-se dois pontos de medição, a 10 cm, ensaio 1.1 e a 25 cm, ensaio 1.2, localização definida com base na escala colocada lateralmente, de forma a estar afastados das margens da caixa. Os dois pontos foram ensaiados para que fosse avaliada a variabilidade da constante dielétrica ao longo da caixa. Na realidade a existência destes dois ensaios são úteis para a avaliação da heterogeneidade da amostra longitudinalmente e em profundidade.

A espessura de balastro no ensaio 1.1 é de 17 cm e no ensaio 1.2 de 18 cm.



Figura V.10. Caixa 1 com balastro limpo e régua de medição

V.III.ii. Caso 2 – Balastro Usado Limpo

Tal como observado na Tabela V.2, o caso de estudo 2 irá apresentar o estudo do balastro usado e limpo.

De modo semelhante ao caso de estudo 1, depois de pesada a caixa 2, procedeu-se à colocação de balastro usado e limpo, como representado na Figura V.11. De notar que, a primeira camada deve ser aplicada com cuidado, para que não se rompa a folha de alumínio. De seguida, pesou-se a caixa 2 (peso da caixa + alumínio + balastro) e obteve-se 82kg.

Para a compactação do balastro limpo foi utilizado o mesmo compactador e o procedimento semelhante ao da caixa 1.

Colocou-se posteriormente uma fita de medição na borda da caixa para que os pontos medidos com as antenas fossem sempre os mesmos. À semelhança da caixa 1, ilustra-se a caixa com balastro e com a régua de medição, para que se possa perceber a diferença no tom de balastro novo e usado. Assim, tomou-se dois pontos de medição, a 10 cm, ensaio 2.1 e a 25 cm, ensaio 2.2.



Figura V.11. Caixa 2 com balastro usado e régua de medição

A espessura de balastro no ensaio 2.1 é de 17 cm e no ensaio 2.2 de 18 cm.

Para comparar a diferença de cor dos balastros (conforme seja novo ou usado, ou seja, da caixa 1 e da caixa 2), apresenta-se a Figura V.12.



Figura V.12. Comparação entre o balastro da caixa 1 e da caixa 2

V.III.iii. Caso 3 – Balastro Usado Contaminado

À semelhança dos casos de estudo 1 e 2 procedeu-se à colocação de balastro na caixa 3. Tal como acima referido, este caso de estudo irá apresentar a análise do balastro usado contaminado. Assim, foram colocadas camadas alternadas de balastro e solo, para que a contaminação fosse uniforme e o solo não estivesse só numa camada acima do balastro., como demonstra a Figura V.13.

A caixa 3 não foi vibrada porque se isso tivesse sido feito toda a contaminação, iria para o fundo da caixa e perdia-se elementos essenciais aquando da medição das contantes dieléctricas.



Figura V.13. Esquema de colocação das camadas de balastro e de solo

Foram então colocadas 4 camadas de 1,5 Kg de solo entre as camadas de balastro, o que equivale a 7,5% de contaminação, como representado na Figura V.14.

Balastro Usado
1,5 Kg de solo
Balastro Usado
1,5 Kg de solo
Balastro Usado
1,5 Kg de solo
Balastro Usado
1,5 Kg de solo
Balastro Usado
Fundo da Caixa

Figura V.14. Representação gráfica das camadas de balastro e solo

De seguida, pesou-se a caixa 3 (peso da caixa + alumínio + balastro + solo) e obteve-se 81kg. À semelhança dos casos de estudo 1 e 2 colocou-se posteriormente uma fita de medição na borda da caixa para que os pontos medidos com as antenas fossem sempre os mesmos. A espessura de balastro no ensaio 3.1 é de 17 cm e no ensaio 3.2 de 18 cm.

Seguidamente, para a avaliação do teor em água do solo (teor de água óptimo de 12%) procedeu-se à colocação na estufa de um tabuleiro com uma amostra de 245,38 g de solo. Depois de estar mais de 24 horas dentro da estufa pesou-se este tabuleiro novamente, resultando em 231,78 g.

Assim, o peso da água é dado por $245,38 \text{ g} - 231,78 \text{ g}$, ou seja 13,62g. O solo tem assim um teor de água de 5,5%.

V.III.iv. Caso 4 – Balastro Usado Muito Contaminado

À semelhança do caso de estudo 3 procedeu-se à colocação de balastro na caixa 4.

Tal como acima referido, este caso de estudo irá apresentar a análise do balastro usado muito contaminado. Assim, o balastro e o solo foram colocados em camadas, para que a contaminação, o solo, fosse uniforme distribuída na profundidade da camada de balastro. A caixa 4 não foi vibrada porque, como já referido anteriormente poderia segregar, e assim o solo iria para o fundo da caixa e perdia-se elementos essenciais aquando da medição das contantes dieléctricas.

Foram assim colocadas 4 camadas de 3 Kg de solo entre as camadas de balastro, o que equivale a 15% de contaminação, como representado na Figura V.15.

Balastro Usado
3 Kg de solo
Balastro Usado
3 Kg de solo
Balastro Usado
3 Kg de solo
Balastro Usado
3 Kg de solo
Balastro Usado
Fundo da Caixa

Figura V.15. Representação gráfica das camadas de balastro e solo

De seguida, pesou-se a caixa 4 (peso da caixa + alumínio + balastro + solo) e obteve-se 81kg. À semelhança dos casos de estudo 1, 2 e 3 colocou-se posteriormente uma fita de medição na borda da caixa para que os pontos medidos com as antenas fossem sempre os mesmos. A espessura de balastro no ensaio 4.1 é de 17 cm e no ensaio 4.2 de 17 cm.

O solo utilizado na caixa 4 é igual ao da caixa 3, ou seja, tem um teor de água de 5,5% no início do ensaio.

V.III.v. Caso 5 – Balastro Usado Contaminado e com Diferentes Teor em Água no Solo

Para a simulação do balastro contaminado em condições molhadas procedeu-se ao ensaio do balastro com o solo com diferentes teor em água, onde se adicionou água à camada de balastro estudada, como representado na Figura V.16. Colocação de água para a medição de diferentes teores em água.

Depois de realizados os ensaios na caixa 3, com o balastro usado contaminado com solo com teor de água de 5,5%, procedeu-se à colocação de água, previamente pesada, em duas fases diferentes, para que fossem estudadas as constantes dielétricas para mais dois teor em água diferentes do solo de contaminação. Na Tabela V.4 está representada a relação entre o teor em água pretendido e o peso de água adicionado.

Tabela V.4. Teor de água pretendido vs peso de água adicionado

	TEOR DE ÁGUA PRETENDIDO (%)	PESO DE ÁGUA ADICIONADO (Kg)
1ª FASE	10	+ 0,54
2ª FASE	14	+ 0,48



Figura V.16. Colocação de água para a medição de diferentes teores em água

V.III.vi. Caso 6 – Balastro Usado Muito Contaminado e com Diferentes Teor em Água no Solo

À semelhança do caso de estudo 5, foram realizados exactamente os mesmos procedimentos. Para a simulação do balastro muito contaminado em condições molhadas procedeu-se ao ensaio do balastro com o solo com diferentes teor em água.

Depois de realizados os ensaios na caixa 4, com o balastro usado muito contaminado com solo com teor de água de 5,5%, procedeu-se à colocação de água, previamente pesada, em duas fases diferentes, para que fossem estudadas as diferenças nas medições com o GPR para o solo com mais dois em teor de água.

Tabela V.5. Teor de água pretendido vs peso de água adicionado

	TEOR DE ÁGUA PRETENDIDO (%)	PESO DE ÁGUA ADICIONADO (Kg)
1ª FASE	10	+ 0,54
2ª FASE	14	+ 0,48

V.IV. Equipamentos Utilizados

V.IV.i. GSSI air-coupled antennas

As antenas GSSI *air-coupled* foram fornecidas pelo LNEC e são produtos do *Geophysical Survey System* (GSSI). Os dois pares de antenas, que incluem a antena transmissora e a receptora, que foram usadas têm frequências de 1 GHz e de 1,8 GHz.

Estas antenas são antenas suspensas (*air-coupled*) para simular uma situação real de medição, nomeadamente para conseguir a configuração correcta se, por exemplo, se estiverem a medir as

constantes dieléctricas numa linha férrea normal. Assim foram colocadas a cerca de 50 cm acima da superfície do material testado.

No início calibraram-se as antenas para que fosse mais fácil detectar a parte superior e a parte inferior da camada de cada material. Esta calibração foi realizada em 3 passos. Primeiro constitui na colocação de uma folha de alumínio na parte superior da superfície do material para que existisse uma forte reflexão e assim uma grande amplitude de onda, depois mediu-se apenas a reflexão do chão, ou seja, sem material e sem folhas de alumínio; e por fim, mediu-se o material apenas com a folha de alumínio inferior.

Para cada caixa e consequentemente para cada caso de estudo foram realizados dois tipos de ensaio distintos. O primeiro ensaio, o ensaio estático, realizou-se em dois pontos em cada caixa, que se mantiveram iguais para cada antena, com o auxílio de uma régua métrica. O objectivo deste ensaio foi de verificar a variabilidade da constante dieléctrica ao longo da caixa. O segundo ensaio, o ensaio dinâmico, realizou-se medindo a constante dieléctrica a cada 1 cm, com as diversas antenas.

De seguida apresentam-se, na Figura V.17, os dois pares de antenas utilizados e o sistema de aquisição a que estas estão ligadas.

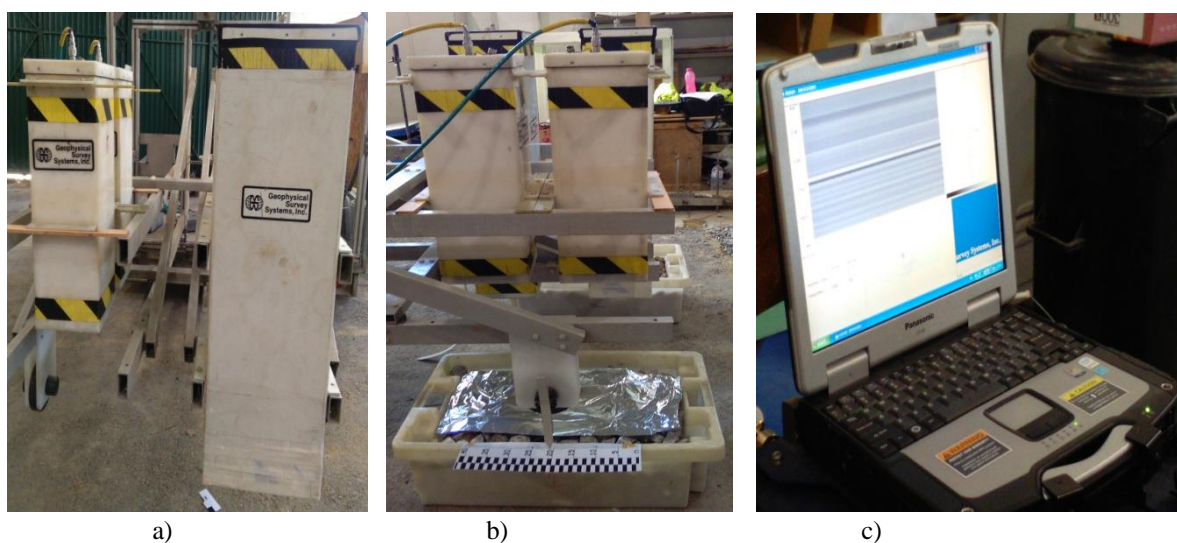


Figura V.17. Equipamento GSSI: a) à esquerda as antenas de 1,8 GHz e à direita as antenas de 1 GHz; b) em funcionamento; c) sistema de aquisição SIR 20 da GSSI.

V.IV.ii. MALA ground-coupled antennas

As antenas MALA foram fornecidas pela Universidade de Vigo no âmbito dos ensaios realizados ao abrigo do Projecto Cost Action TU 2008 – “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar”.

Estas antenas são antenas que ficam em contacto com o balastro aquando da medição e foram utilizadas duas com frequências diferentes, uma com 1 GHz e a outra com 2 GHz. Na Figura V.18 encontram-se imagens das duas antenas utilizadas.



Figura V.18. Equipamento MALA: a) antena de 1 GHz; b) antena de 2,3 GHz.

V.V. Resultados Obtidos

Neste capítulo serão apresentados, primeiramente, os resultados obtidos das reflexões do GPR para 3 casos de estudo distintos. Posteriormente serão apresentadas algumas tabelas que indicam para cada caso de estudo e para cada ensaio os valores das constantes dieléctricas obtidas.

Nas Figura V.19, Figura V.20 e Figura V.21 podemos observar as reflexões dos casos de estudo 1, 3 e 6B, respectivamente. Foram escolhidos estes casos de estudo para que na análise das figuras se pudessem observar as diferenças das reflexões e sobretudo, as diferenças da propagação da onda electromagnética ao longo da camada. Refere-se que se trata da mesma espessura de camada 17 cm nos três casos apresentados.

Pela análise da reflexão referente ao caso de estudo 1, e em comparação com os casos de estudo 3 e 6B, consegue-se perceber que é muito mais fácil distinguir a base da camada (maios ou menos aos 7 ns), pois quanto menos contaminação a camada de balastro tem, mais definição terá na reflexão do GPR. É de notar então, que consequentemente a base da camada é mais esbatida no caso de estudo 6B do que no caso de estudo 3.

Em relação à representação da propagação das ondas electromagnéticas, expostas à direita em cada figura, é de notar que quanto menos contaminado está o balastro, maior é a amplitude de onda reflectida.

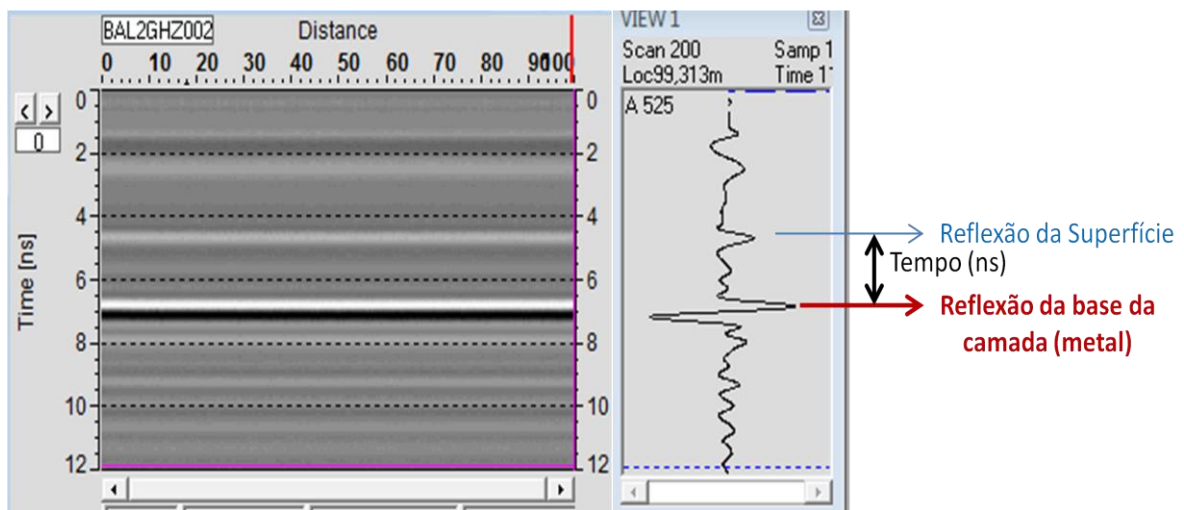


Figura V.19. Reflexão do GPR no caso de estudo 1

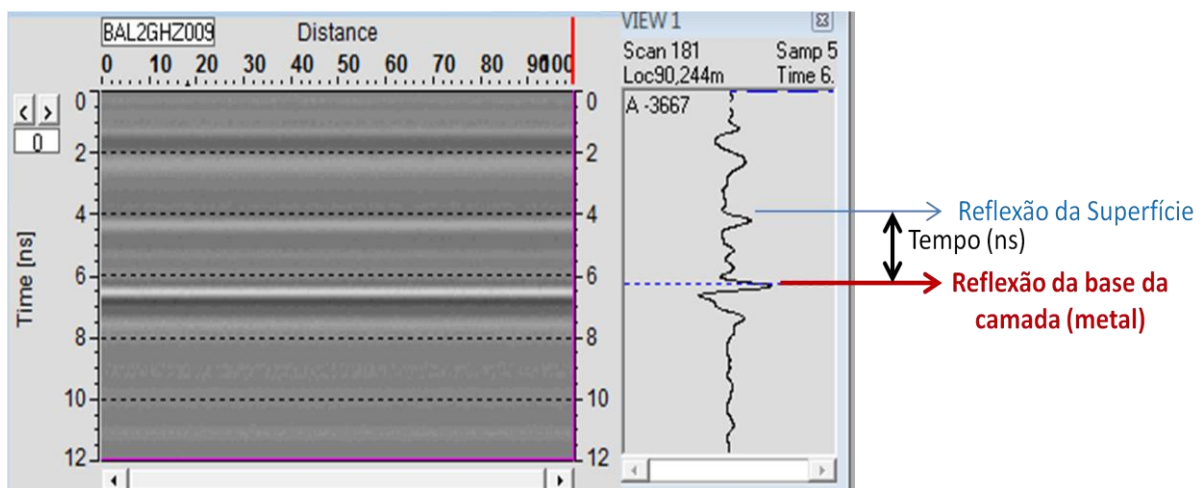


Figura V.20. Reflexão do GPR no caso de estudo 3

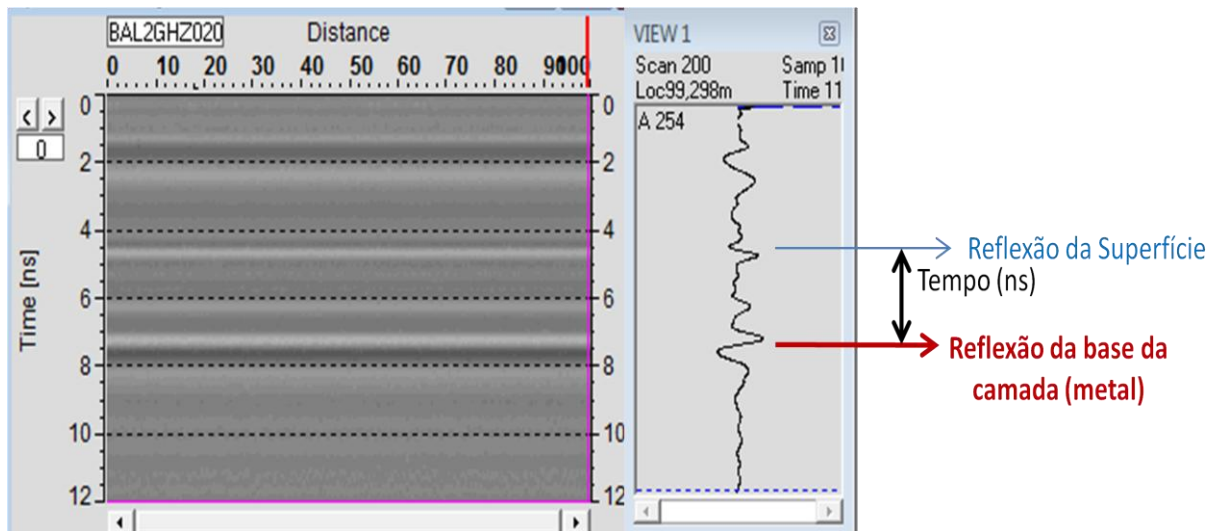


Figura V.21. Reflexão do GPR no caso de estudo 6B, do balastro muito contaminado e teor em água alto

De seguida irão ser apresentados os resultados obtidos para cada um dos ensaios realizados. De notar que serão apresentados o tempo de percurso que o sinal demora entre ser emitido por uma antena e a ser detectado pela outra antena, twt ; a espessura de cada camada, e ; e a velocidade de propagação da onda, v ; e a constante dielétrica, ϵ .

Para o cálculo da velocidade é utilizada a seguinte fórmula:

$$v = \frac{2 \times e}{twt} \quad (V.1)$$

Com,

e – Espessura da camada de balastro;

twt – Tempo de percurso da onda.

Por sua vez, a constante dielétrica obtém-se pela seguinte fórmula:

$$\epsilon = \left(\frac{c}{v} \right)^2 \quad (V.2)$$

Com,

c – Velocidade da luz no vácuo: $c = 30\text{ns/cm}$;

v – Velocidade de propagação de onda.

De seguida, apresentam-se os resultados de cada caso de estudo, salienta-se que as células em branco correspondem às antenas da GSSI e as sombreadas correspondem às antenas da MALA.

Caso de Estudo 1

Tabela V.6. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 1

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 1 0% DE CONTAMINAÇÃO	1,1	1	2,5	13,60	4,87
		1,8	2,44	13,93	4,64
		1	2,27	14,98	4,01
		2,3	2,23	15,25	3,87
	1,2	1	2,58	13,95	4,62
		1,8	2,56	14,06	4,55
		1	2,27	15,86	3,58
		2,3	2,32	15,52	3,74

Caso de Estudo 2

Tabela V.7. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 2

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 2 0% DE CONTAMINAÇÃO	2,1	1	2,62	12,98	5,3
		1,8	2,47	13,77	4,7
		1	2,33	14,59	4,2
		2,3	2,25	15,11	3,9
	2,2	1	2,58	13,95	4,6
		1,8	2,59	13,90	4,7
		1	2,33	15,45	3,8
		2,3	2,27	15,86	3,6

Caso de Estudo 3

Tabela V.8. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 3

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 3 7,5 % DE CONTAMINAÇÃO 5,5 % DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO	3,1	1	2,66	12,78	5,5
		1,8	2,54	13,39	5,0
		1	2,33	14,59	4,2
		2,3	2,4	14,17	4,5
	3,2	1	2,7	13,33	5,1
		1,8	2,64	13,64	4,8
		1	2,51	14,34	4,4
		2,3	2,31	15,58	3,7

Caso de Estudo 4

Tabela V.9. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 4

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 4 15 % DE CONTAMINAÇÃO 5,5 % DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO	4,1	1	2,9	11,72	6,5
		1,8	2,76	12,32	5,9
		1	2,64	12,88	5,4
		2,3	2,42	14,05	4,6
	4,2	1	2,78	12,23	6,0
		1,8	2,66	12,78	5,5
		1	2,6	13,08	5,3
		2,3	2,36	14,41	4,3

Caso de Estudo 5

Neste caso de estudo vão ser apresentados as duas fases de colocação de água, ou seja, para um teor de água de 10% e para um teor de água de 14%.

Tabela V.10. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 5A

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 3 7,5 % DE CONTAMINAÇÃO 10 % DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO	3,1	1	2,74	12,41	5,8
		1,8	2,54	13,39	5,0
		1	2,42	14,05	4,6
		2,3	2,52	13,49	4,9
	3,2	1	2,7	13,33	5,1
		1,8	2,69	13,38	5,0
		1	2,59	13,90	4,7
		2,3	2,58	13,95	4,6

Tabela V.11. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 5B

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 3 7,5 % DE CONTAMINAÇÃO 14 % DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO	3,1	1	2,82	12,06	6,2
		1,8	2,73	12,45	5,8
		1	2,59	13,13	5,2
		2,3	2,56	13,28	5,1
	3,2	1	2,74	13,14	5,2
		1,8	2,73	13,19	5,2
		1	2,59	13,90	4,7
		2,3	2,58	13,95	4,6

Caso de Estudo 6

À semelhança do caso de estudo 5, vão ser apresentados as duas fases de colocação de água, ou seja, para um teor de água de 10% e para um teor de água de 14%.

Tabela V.12. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 6A

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 4 15 % DE CONTAMINAÇÃO 10 % DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO	4,1	1	2,98	11,41	6,9
		1,8	2,88	11,81	6,5
		1	2,72	12,50	5,8
		2,3	2,56	13,28	5,1
	4,2	1	2,94	11,56	6,7
		1,8	2,81	12,10	6,1
		1	2,76	12,32	5,9
		2,3	2,52	13,49	4,9

Tabela V.13. Apresentação das constantes dielétricas para o caso de estudo 6B

	ENSAIOS	FREQUÊNCIA DAS ANTENAS (GHz)	tw (ns)	v (ns/cm)	ϵ
CAIXA 4 15 % DE CONTAMINAÇÃO 14 % DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO	4,1	1	3,02	11,26	7,1
		1,8	3,05	11,15	7,2
		1	2,8	12,14	6,1
		2,3	2,7	12,59	5,7
	4,2	1	3,02	11,26	7,1
		1,8	2,95	11,53	6,8
		1	2,76	12,32	5,9
		2,3	2,56	13,28	5,1

V.VI. Análise dos Resultados

De um modo geral, ao analisar as tabelas posteriormente expostas, que apresentam os resultados das 4 antenas para cada caso de estudo, constata-se que as antenas fornecidas pelo LNEC – as antenas GSSI, apresentam maiores valores de constantes dielétricas do que as antenas MALA, como demonstra a Figura V.22.

Em relação aos dois grupos de antenas quanto mais alta for a frequência das antenas mais baixo será o valor da constante dielétrica.

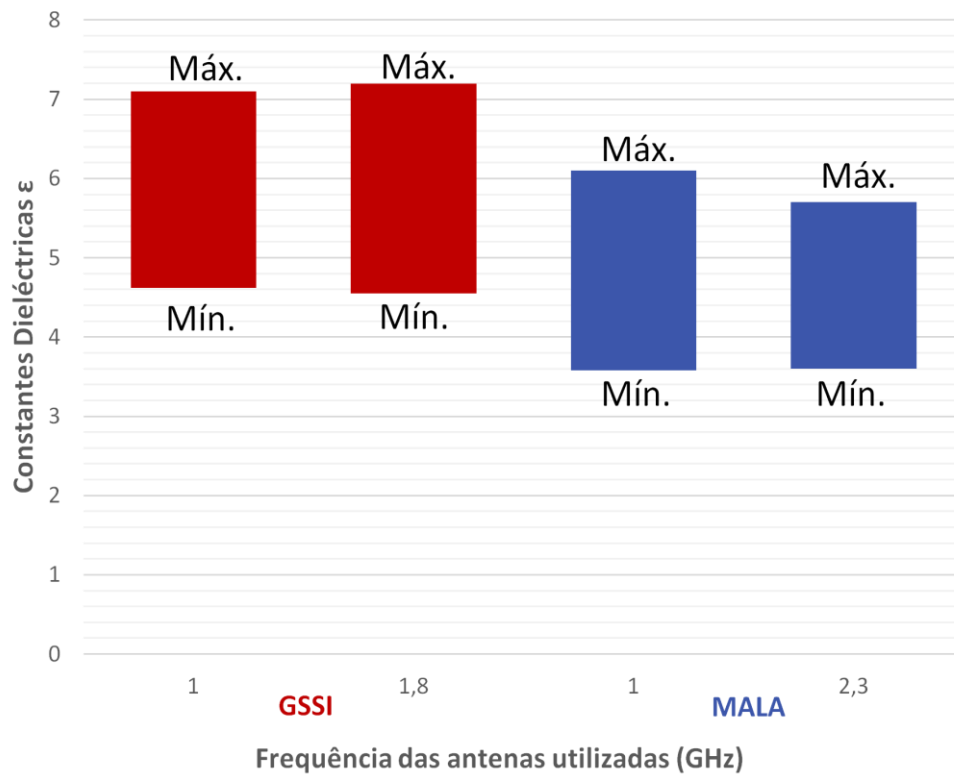


Figura V.22. Análise dos resultados das constantes dielétricas para cada antena nos diversos casos de estudo

De seguida irão ser apresentadas, em forma de gráfico, as análises realizadas dos resultados obtidos nos ensaios efectuados em laboratório, cujos valores foram apresentados no subcapítulo anterior. As primeiras três figuras irão relacionar em forma de gráfico, para as mesmas frequências de antenas, os diferentes casos de estudo.

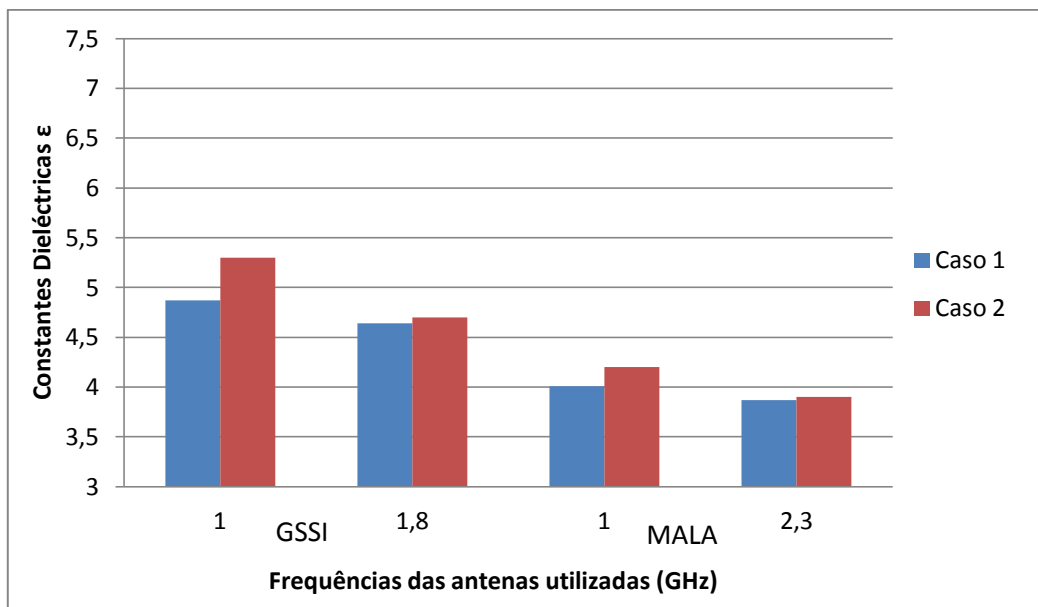


Figura V.23. Análise das constantes dielétricas nos casos de estudo 1 e 2

Na Figura V.23 relacionaram-se os valores do caso de estudo 1 com os do caso de estudo 2 (utilização de balastro novo e limpo vs utilização de balastro usado e limpo). A utilização de balastro usado implica que este embora limpo, já tenha sido rolado e consequentemente algumas arestas já tenham sido esmagadas, o que provoca que a camada de balastro, tenha menos vazios entre as partículas e se molde mais à caixa. Assim esta análise é importante para se saber se a influência de menos ar junto das partículas é significativa nos valores das constantes dielétricas da camada.

Ao analisar a Figura V.23 verificamos que há um aumento em todas as antenas dos valores das constantes dielétricas no caso de estudo 2, em relação ao caso de estudo 1. Embora em casos gerais não se considere o estado inicial do balastro como justificação de grandes aumentos dos valores de constante dielétrica, pode-se verificar que este pode influenciar numa unidade os seus valores.

Nas Figura V.24 e Figura V.25, apresentam-se separadamente os intervalos de valores das constantes dielétricas para uma determinada contaminação (7,5% ou 15%) e para diferentes teores de água.

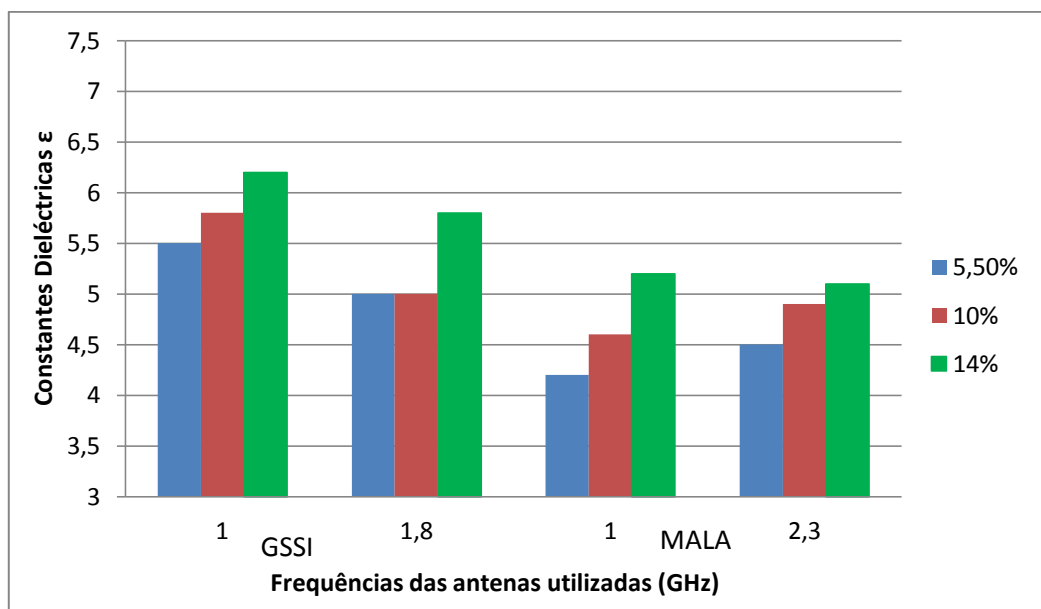


Figura V.24. Análise das constantes dielétricas na caixa 3, com 7,5% de contaminação (caso de estudo 3, 5A e 5B)

É de notar, ao analisar a Figura V.24, que para o mesmo nível de contaminação o valor da constante dielétrica difere muito consoante o teor de água no solo. O aumento dos valores das constantes dielétricas consoante o teor de água no solo não é regular entre as diferentes antenas. Contudo, para a antena de GSSI de 1,8 GHz – antena mais sensível ao teor de água, para o valor de teor de água de 14% se note um aumento considerável na constante dielétrica.

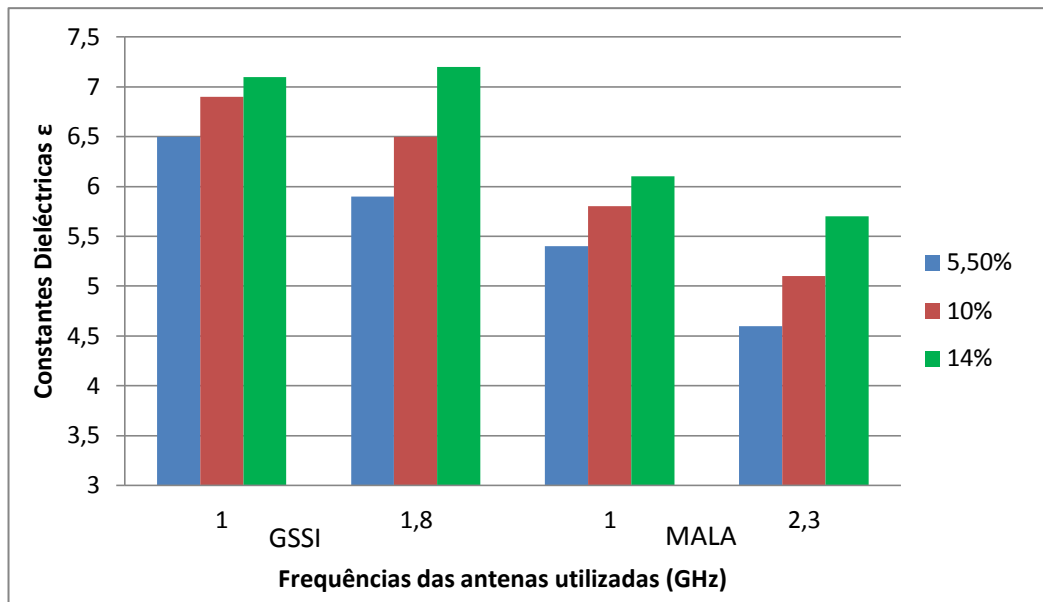


Figura V.25. Análise das constantes dielétricas na caixa 4, com 15 % de contaminação (caso de estudo 4, 6A e 6B)

Se analisarmos a Figura V.25 constata-se que também para grandes aumentos do teor de água do solo, quando a percentagem de contaminação da camada de balastro é de 15%, os valores das constantes dielétricas aumentam.

Assim, pode prever-se que se forem efectuadas medições, num dia após um período com níveis de pluviosidade muito elevados, as constantes dielétricas poderão assumir valores bastantes superiores a um período com condições meteorológicas secas. Assim é expectável haver diferenças entre medições realizadas com GPR em épocas de ano diferentes, inverno e verão, principalmente nas zonas que apresentam níveis de contaminação elevados do balastro.

De seguida, irão ser apresentados os gráficos que relacionam as constantes dielétricas da camada de balastro quanto ao seu estado (novo e limpo, usado e limpo e usado com contaminação); quanto à sua contaminação (sem contaminação e com contaminação de 7,5% e 15%); quanto ao teor de água do solo (5,5%, 10% e 14%) e, finalmente, é apresentado um gráfico que indica os valores extremos, mínimo e máximo, das constantes dielétricas. Para estas comparações já enunciadas apenas se irão comparar as duas antenas do GSSI, sendo as disponíveis no LNEC para essas medições.

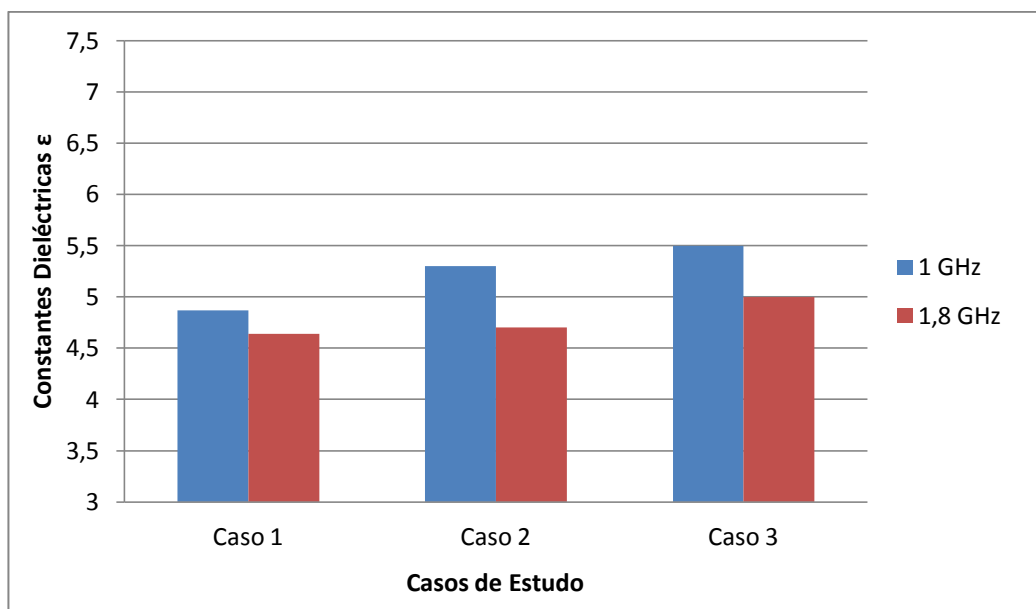


Figura V.26. Análise das constantes dielétricas quanto ao estado do balastro

Como já referido anteriormente, e pela Figura V.26, embora haja um aumento do valor da constante dielétrica do caso de estudo 1 para o caso de estudo 2 este não é muito significativo. Contudo, este começa já a ser prejudicial se a camada de balastro se encontrar contaminada, como é o caso de estudo 3.

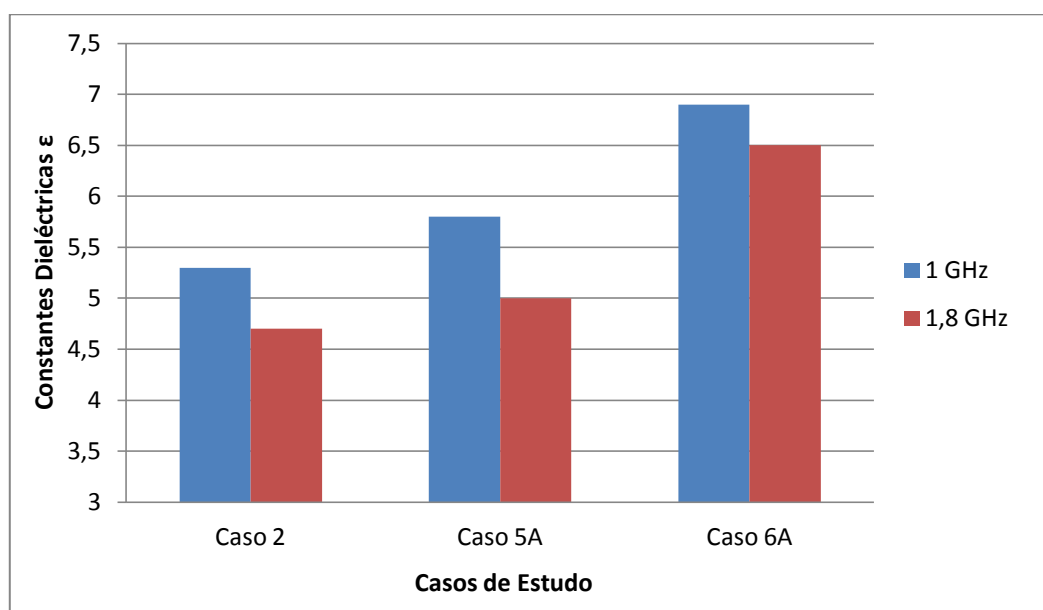


Figura V.27. Análise das constantes dielétricas quanto ao nível de contaminação

Pela Figura V.27 constata-se que a contaminação influencia muito negativamente os valores das constantes dielétricas. Embora do caso de estudo 5A para o caso de estudo 6A a contaminação duplique, de 7,5% para 15%, os valores das constantes dielétricas mais que duplicam. Assim, consegue-se perceber que a contaminação do balastro é muito prejudicial para as vias férreas e, quanto mais o balastro estiver contaminado mais drasticamente aumentam os valores das constantes dielétricas.

O uso permanente do balastro contaminado sem manutenção ou conservação é muito prejudicial para as infraestruturas ferroviárias podendo provocar assentamentos das camadas ao longo da via férrea. Em consequência disto os carris e as travessas também correm perigo, levando a sua degradação acelerada, o que influencia por sua vez o bom funcionamento do material circulante, podendo este ser alvo de descarrilamento.

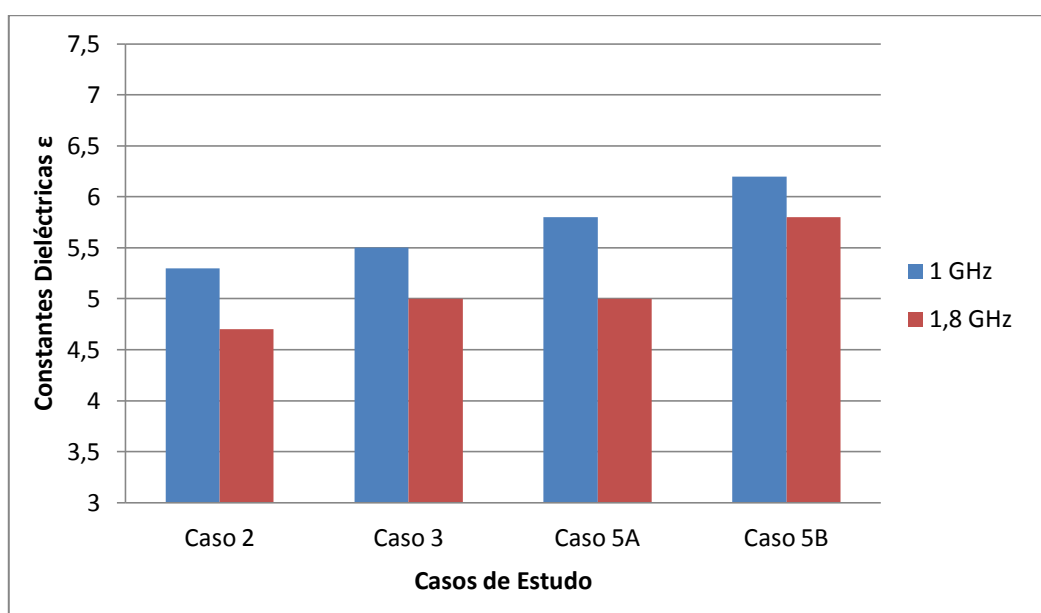


Figura V.28. Análise das constantes dielétricas quanto ao teor de água do solo

Com o aumento dos níveis de teor de água no solo, como ilustra a Figura V.28, aumentam também os valores das constantes dielétricas em cada ponto da camada. Este aumento, embora possa parecer pelo gráfico, um aumento gradual, se se analisar em separado o caso de estudo 2 com o caso de estudo 5B nota-se um aumento significativo de mais de 15%.

Assim, pode perceber-se que as condições meteorológicas afectam consideravelmente as infraestruturas ferroviárias. Ou seja, não é só preciso saber para que país é que são dimensionadas as linhas férreas e consequentemente avaliar-se os níveis de pluviosidade a que as mesmas vão estar sujeitas, como também é necessário que seja elaborada uma boa drenagem das vias férreas em questão. Isto é, para quando chover a água não ficar toda retida em cima da camada de balastro, porque esta depois irá ser absorvida. Quanto mais a contaminação, mais água é retida na camada de balastro.

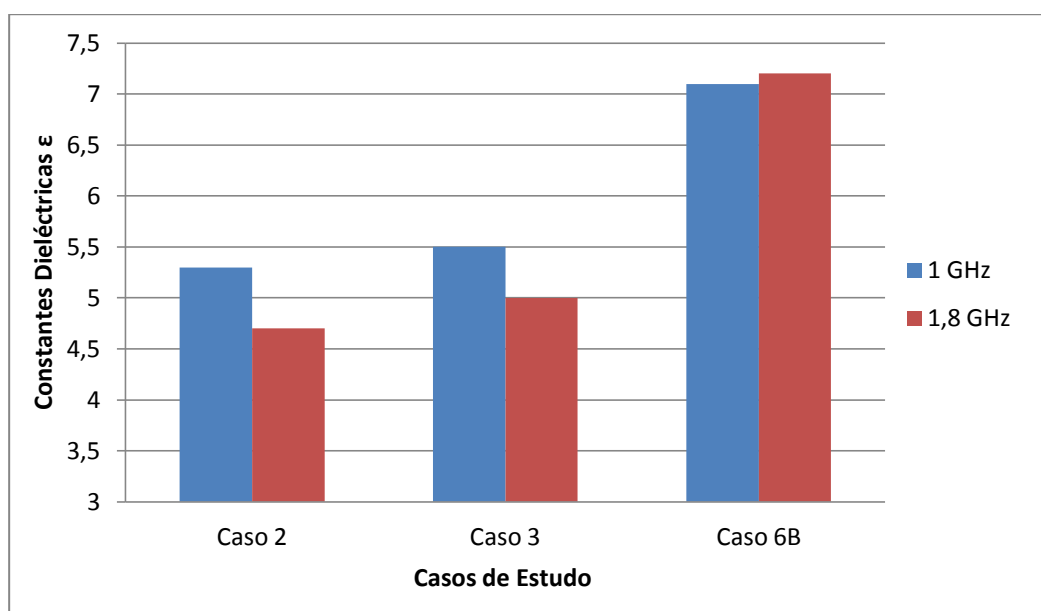


Figura V.29. Análise da gama máxima de variação das constantes dielétricas

Esta última figura, a Figura V.29, mostra que há uma grande influência para os valores das constantes dielétricas por parte da contaminação do balastro e do teor em água do solo. Comparando o caso de estudo 2 com o caso de estudo 6B, os ensaios mais díspares, constatamos que há um aumento de mais de 30% dos valores das constantes dielétricas.

VI. CASO DE ESTUDO DE UMA VIA EM SERVIÇO

VI.I. Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma análise sobre a evolução da qualidade de uma infraestrutura ferroviária ao longo do tempo de uma via ferroviária portuguesa em serviço, cuja identificação não será feita neste estudo por razões de confidencialidade.

Para a realização deste estudo primeiramente, teve que se fazer inspecções e levantamentos no terreno, para que a via fosse caracterizada com mais pormenor, sendo assim possível perceber qual o estado da geometria de via, o tipo e o estado dos carris, qual o tipo de travessas, qual o nível de colmatção do balastro (contaminação visível à superfície ou presença de interface no registo do GPR próximo da superfície), em relação à drenagem, qual o tipo de valeta (no lado esquerdo e no lado direito da via) e o estado das mesmas, qual o estado da passagem hidráulica e finalmente, quais os taludes identificados para intervenção; e, quais as limitações de velocidade impostas em cada troço. Estes estudos foram realizados nos períodos de Novembro de 2013 até Fevereiro de 2014, entre Abril e Maio de 2014 e ainda em Março de 2015.

Assim, foram analisadas e identificadas as acções que se consideram imprescindíveis para conseguir repor os níveis de qualidade da via, nomeadamente em termos de segurança e conforto dos passageiros. Estas propostas de intervenção estão previstas para os anos de 2015 e 2017. De seguida, na Tabela VI.1, é apresentado um breve cronograma, onde são enumeradas as actividades principais.

Tabela VI.1. Cronograma das principais actividades (adaptado de Doc., 2014)

ACTIVIDADE	2013		2014						2015	2016-2017
	NOV.	DEZ.	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	MAR.	JUN.
INSPECÇÕES/ LEVANTAMENTO NO TERRENO										
CARACTERIZAÇÃO DA INFRAESTRUTURA										
PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO										

VI.II. Breve Caracterização

A linha ferroviária neste trabalho analisada, tem uma extensão de cerca de 200 km. Para efeitos de caracterização da infraestrutura, sendo que os planos de intervenção da mesma ainda não foram todos impostos à data da realização do trabalho, e para que se possa proteger a entidade realizadora deste trabalho, por respeito à sua confidencialidade não se irão abordar aspectos de localização da via nem de nenhum dos troços, como já referido.

A infraestrutura actual desta via apresenta alguma heterogeneidade, sendo que a implementação da sua construção e reabilitação ocorreu em 4 períodos distintos, o último das quais aconteceu na década de 90 e constou das acções que a seguir são discriminadas (Doc, 2014):

- A - B, construiu-se uma linha nova paralela à antiga, que constitui a via descendente, enquanto a existente, atual via ascendente, manteve todo o seu armamento (travessas, fixações e carris);
- B - C , foi realizada uma Renovação integral da via (RIV) na qual foram substituídas as travessas de madeira por travessas de betão bibloco, com a execução de rebalastragem e

- de desguarnecimentos pontuais onde necessário, sendo substituído o carril da via com juntas, Barra Curta (BC), por um carril em Barra Longa Soldada (BLS);
- C - D, procedeu-se a uma Renovação Integral da Via (RIV), com aplicação de travessas de betão monobloco e de carril de 60 kg/m;
 - D - E, foram construídas algumas variantes e foi rebalastrada a parte restante;
 - E - F, não houve qualquer intervenção apesar de estarem projectadas várias variantes/ripagens;
 - F - G, foram construídas várias variantes, tendo sido efectuada a Renovação Integral da Via (RIV), com aplicação de travessas de betão monobloco e de carril com 60 kg/m;
 - G – G1, foram apenas construídas algumas variantes;
 - G1 - H, não houve qualquer intervenção.

A Tabela VI.2 identifica sucintamente as RIV realizadas na linha, por troços, e respetivos períodos de execução.

Tabela VI.2. RIV realizadas: troços e períodos de execução (adaptado de Doc., 2014)

TROÇO					RENOVAÇÃO INTEGRAL DA VIA (DÉCADA)
KM _{Inicial}	LOCAL	KM _{Final}	LOCAL	VIA	
51.190	A	58.320	B	VA	70 (início)
51.190	A	58.320	B	VD	90
58.320	B	72.990	C	VU	70 (início)
72.990	C	100.010	D	VU	90
100.010	D	115.000	E	VU	70 (início)
115.000	E	173.800	F	VU	80
173.800	F	207.210	G	VU	90
207.210	G	252.250	H	VU	70 (fim)

Na Tabela VI.3 é apresentada a extensão de via cujo estado da geometria é considerado mau ou deficiente, em cada um dos troços definidos anteriormente.

Tabela VI.3. Estado da geometria de via em cada troço (adaptado de Doc., 2014)

TROÇO			GEOMETRIA DE VIA - MÁ/DEFICIENTE	
INÍCIO	FIM	EXTENSÃO (m)	EXTENSÃO (m)	(%)
A	B	7130	2800	39
B	C	14670	11400	78
C	D	27020	4400	76
D	E	14990	4600	31
E	F	58800	21600	37
F	G	33410	3000	9
G	H	45040	3000	7

Pela Tabela VI.3, constata-se que dos 208 km de via que constituem esta linha, cerca de 68 km, o que corresponde a 32% da linha, foram renovados na década de 90. A restante infraestrutura cerca de 140 km tem actualmente entre 30 a 45 anos, idade de referência para o fim do ciclo de vida destas infraestruturas.

Verifica-se que o troço B – C é o que se encontra mais degradado, com 78% de extensão apresentando geometria de via deficiente. Observa-se também que, com excepção do troço G – H, todos os outros onde a RIV já foi realizada há mais de 30 anos, têm geometria má ou deficiente numa extensão superior a 30% do troço.

Para a classificação da via seguiram-se os critérios apresentados na Tabela VI.4:

Tabela VI.4. Classificação da Via relativamente à sua taxa de degradação (adaptado de Doc., 2014)

CLASSIFICAÇÃO	NIV. LONG. (ESTADO)	TAXA DE DEGRADAÇÃO
Aceitável	QN1	Até 0,5mm/ano
Deficiente	QN1	Superior a 0,5mm/ano
	QN2	Até 0,5mm/ano
Má	QN2	Superior a 0,5mm/ano
	QN3	-

O estado de geometria de via tem a si associadas outras deficiências, como o estado do carril, das travessas e das drenagens, estes geralmente são a sua causa. Isto ocorre, porque tem havido

um constante abandono e/ou adiamento de alguns projectos motivados pela crise económica que o país está a atravessar.

Assim, é fácil perceber que, já há algum tempo, que a infraestrutura desta linha tem vindo a evidenciar, em grande parte da sua extensão, sinais claros de fim de ciclo de vida e/ou falta de investimento ao nível da manutenção. Em consequência desta realidade e de dois invernos mais chuvosos que o habitual foram introduzidas na linha numerosas limitações de velocidade (LV), que obviamente têm causado restrições ao nível da oferta comercial disponibilizada.

Constata-se que, os troços onde a superestrutura de via não foi modernizada na década de 90, encontram-se muito degradados, necessitando de renovação e intervenção na plataforma de via, surgindo com frequência assentamentos e efeitos de *pumping*, acarretando encargos sistemáticos para manter o nivelamento da via. Nestas circunstâncias, como é natural, o desempenho da circulação tem sido bastante afectado (Doc., 2014).

VI.III. Apresentação dos Casos de Estudo

Os casos de estudo irão ser apresentados com base nos troços onde se prevê o desguarnecimento mecânico pesado, apresentados na Tabela VI.5, nas futuras intervenções da via-férrea. Estes pontos foram escolhidos por apresentarem já sinais de degradação e contaminação de balastro e pela necessidade de intervenção na geometria de via.

Irão ser apresentados dois casos de estudo de dois troços distintos e as medições realizadas nesses em duas épocas diferentes (Maio de 2013 e Outubro de 2015). No primeiro caso de estudo apresentam-se pontos em que não foi realizada intervenção, ou seja, pretende-se avaliar se a degradação ao longo de mais de dois anos, de uma área que já precisava de intervenção, é crítica ou se não há grandes alterações nas reflexões executadas.

No segundo caso de estudo apresentam-se pontos numa área que também precisava de intervenção mas, ao contrário do primeiro caso de estudo, esta foi executada. Assim, pretende-se avaliar se nas reflexões apresentadas pelo GPR existem grandes alterações ou se estas se mantêm similares.

Tabela VI.5. Locais onde estão previstos os desguarnecimentos mecânicos pesados (adaptado de Doc., 2014)

LOCAL	KM _{INICIAL}	LOCAL	KM _{FINAL}	LOCAL	DESIGNAÇÃO
L1	62.800	B	63.200	C	Substituição de carril
L2	63.900	B	64.500	C	
L3	65.800	B	66.400	C	
L4	93.260	C.1	93.970	D	
L5	117.800	D.1	118.400	D.2	
L6	59.650	B	59.920	C	Desguarnecimento Mecânico Pesado
L7	65.040	B	65.190	C	
L8	82.070	C	82.250	C.1	
L9	117.550	E.1	118.220	E.2	
L10	119.900	E.1	120.160	E.2	
L11	132.550	E.2	132.800	E.3	
L12	141.300	E.3	141.500	E.4	
L13	153.900	E.5	154.000	E.6	
L14	163.500	E.6	163.950	E.7	

Para uma melhor comparação entre as medições realizadas no mesmo caso de estudo em diferentes datas e entre as medições realizadas nos diferentes casos de estudo apresentados foram avaliados 4 pontos distintos, consoante se o nível de colmatção do balastro era visível à superfície ou detectado no GPR. Assim, elaborou-se uma tabela, a Tabela VI.6, para uma mais fácil interpretação destes pontos e onde estes são definidos (para cada caso de estudo).

Tabela VI.6. Locais escolhidos para análise nos diferentes casos de estudo

NÍVEL DE COLMATAÇÃO DO BALASTRO	1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
VISÍVEL À SUPERFÍCIE				
GPR – PRÓXIMO DA SUPERFÍCIE				

Posteriormente, e com base nos resultados das reflexões medidas pelo GPR, foram calculadas as constantes dieléctricas em cada ponto. Tanto a visualização das reflexões, como o cálculo das constantes dieléctricas são elaboradas com base no programa *RailwayDoctor*, cujo exemplo de uma janela de registo se encontra na Figura VI.1.

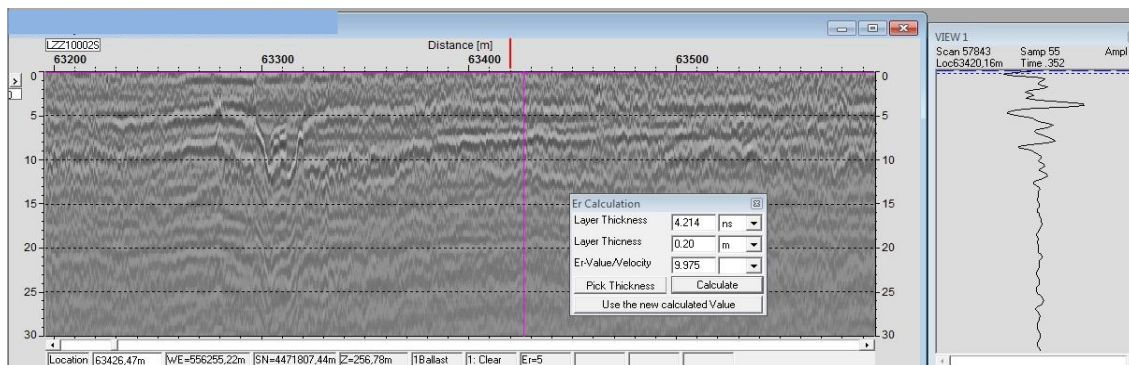


Figura VI.1. Exemplo de uma janela de registo do GPR no programa de visualização e interpretação

Na Figura VI.1, consegue-se então visualizar à esquerda um exemplo de registo de um radargrama, à direita o exemplo de uma propagação de uma onda electromagnética correspondente e ao meio a janela “*ER Calculation*” utilizada para o cálculo das constantes dieléctricas em cada ponto e em cada camada.

VI.III.i. Caso 1 – Troço B – C

O caso de estudo 1 está situado no local L7 que assenta no troço B (58.320) – C (72.990). Para este caso de estudo foram analisados os pontos que a Tabela VI.7 apresenta de seguida:

Tabela VI.7. Pontos analisados no caso de estudo 1

NÍVEL DE COLMATAÇÃO DO BALASTRO	1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
VISÍVEL À SUPERFÍCIE				
GPR – PRÓXIMO DA SUPERFÍCIE				
PONTOS (KM)	65.300	65.100	65.800	65.450

De modo a ter uma análise mais completa dos pontos a observar em cada caso de estudo irá também proceder-se ao estudo da geometria da via, do carril e das travessas em cada ponto referido na Tabela VI.8. Este estudo irá permitir a identificação dos problemas existentes e uma posterior comparação entre os pontos dos vários troços de modo a saber se o estado da geometria de via influencia o nível de colmatação do balastro.

Tabela VI.8. Características dos pontos analisados no caso de estudo 1

PONTOS QUILOMÉTRICOS		65.100 (2º PONTO)	65.300 (1º PONTO)	65.450 (4º PONTO)	65.800 (3º PONTO)
ESTADO DE GEOMETRIA DE VIA		Mau	Mau	Aceitável	Mau
CARRIL	TIPO	54 E1	54 E1	54 E1	54 E1
	ESTADO	Mau	Mau	Aceitável	Mau
TRAVESSAS - TIPO		Bibloco	Bibloco	Bibloco	Bibloco

Maio de 2013

De seguida, na Figura VI.2, apresentam-se as reflexões do GPR em cada ponto quilométrico referentes ao caso de estudo 1 – circundadas a vermelho – e, também da sua envolvente. De notar, que no eixo esquerdo do gráfico da reflexão, se encontra o tempo em nano segundos (ns), no eixo superior a distância em metros (m) e, no eixo direito a profundidade em metros (m).

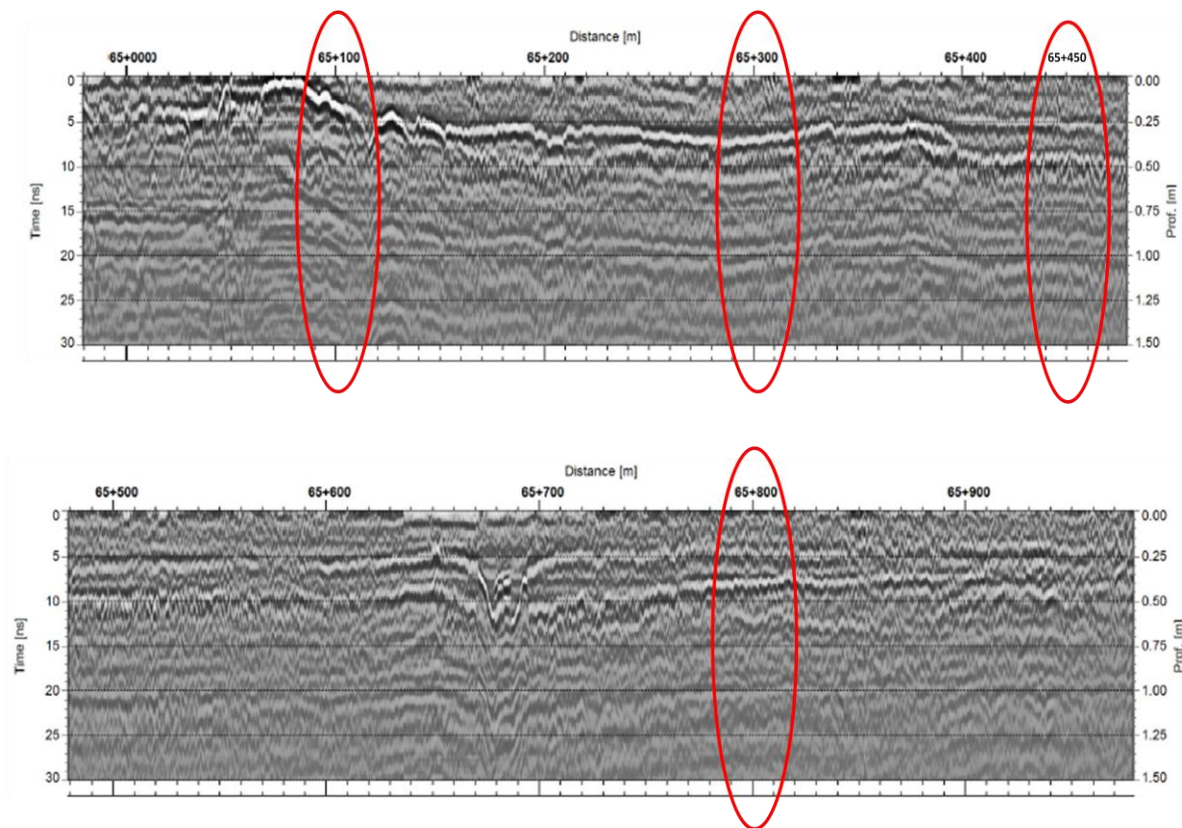


Figura VI.2. Reflexões do GPR no caso de estudo 1 – Maio de 2013

Como se pode analisar, na Figura VI.2, as reflexões apresentadas pelo GPR são muito distintas em cada ponto. É de notar que, como já descrito anteriormente, nos pontos em que a base da camada aparece com um branco mais vivo, como é o caso do 1º e 2º pontos, são os que têm menos contaminação. É de referir também, que pela análise das reflexões, no 3º ponto existem duas camadas de balastro e no 4º ponto existem três camadas de balastro. A separação das mesmas é identificada, em cada ponto, por linhas mais visíveis e, também, pela reflexão da propagação da onda electromagnética.

A existência de duas ou três camadas em cada ponto deve-se essencialmente, a uma recolocação da camada de balastro em acções de manutenção e conservação da via-férrea. Esta deposição de mais balastro em zonas que por si só já precisavam de intervenção, só agrava o efeito e, apesar de ser a solução mais rápida e que menos dificulta o andamento normal do material circulante, esta só piora a longo prazo o efeito, em cada ponto, que a camada de balastro detém.

Posteriormente, e com base nos resultados das reflexões elaboradas pelo GPR, foram calculadas as constantes dieléctricas em cada camada de cada ponto, com o auxílio do programa *RailwayDoctor*.

Infelizmente, ao longo da via ferroviária analisada, em momento algum e em ponto algum foram elaborados poços na zona de intervenção. Embora a abertura de poços não esteja directamente relacionada com o caso de estudo que se apresenta, é muito importante para se saber a espessura das camadas em cada ponto.

Como tal não foi possível, teve de se arranjar outra solução. Assim, ao analisar as reflexões do GPR escolheram-se 10 pontos em que as mesmas em conjunto com os valores das constantes dieléctricas demonstravam que a contaminação do balastro era aceitável. Nesses mesmos pontos adoptou-se uma espessura de 30 cm a cada 5 ns. Os valores nestes pontos tinham de ter resultados aceitáveis, porque, como já constatado nas medições realizadas em laboratório, as constantes dieléctricas podem variar muito dependendo da contaminação do balastro.

Esta espessura, embora seja uma aproximação ao valor real, é um valor aceitável para a condição de via em questão e para a espessura normalmente prevista neste tipo de material (25cm a 30 cm). Os valores de constates dieléctricas também se demonstraram aceitáveis para os 10 pontos analisados com contaminações razoáveis.

Tabela VI.9. Resultados das constantes dieléctricas no caso de estudo 1 - Maio de 2013

RESULTADOS DE MAIO DE 2013		1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
		65.100	65.300	65.450	65.800
1ª CAMADA	tw (ns)	2,408	5,618	4,013	3,712
	e (m)	0,15	0,35	0,3	0,25
	ε	5,79	5,789	4,02	4,953
2ª CAMADA	tw (ns)	-	-	4,816	3,311
	e (m)	-	-	0,25	0,15
	ε	-	-	8,338	10,947
3ª CAMADA	tw (ns)	-	-	-	4,214
	e (m)	-	-	-	0,2
	ε	-	-	-	9,975

Ao analisar os valores das constantes dieléctricas, pela Tabela VI.9, e com o auxílio das reflexões do GPR conseguimos prever o nível de colmatção do balastro em cada ponto. De acordo com esperado (nível de esbatimento das linhas que representam a base de cada camada), e fazendo uma comparação entre os diferentes pontos, o balastro encontra-se mais contaminado no 4º ponto – valor da constante dieléctrica mais elevada, e menos contaminado no 1º ponto.

A existência de mais que uma camada nos 3º e 4º pontos é confirmada não só pela reflexão registada no ficheiro de medição GPR como justificada pelos valores que as constantes dieléctricas apresentam nas camadas inferiores. Estes valores são muito elevados o que correspondem a níveis de contaminação também eles muito elevados. Contudo, e apesar desta solução não ser viável a longo prazo, é de notar uma melhoria significativa nas camadas superiores em que os valores das constantes dieléctricas são drasticamente inferiores.

Outubro de 2015

No ano de 2015 foram realizadas várias medições, das quais, os resultados que se apresentam de seguida são referentes às realizadas em Outubro. Estas medições têm uma particularidade já que foram efectuadas após um longo período de chuva (uma semana).

De seguida, e em sequência dos resultados de Maio de 2013, apresentam-se, na Figura VI.3, as reflexões do GPR em cada ponto quilométrico referentes ao caso de estudo 1 – circundadas a vermelho – e, também da sua envolvente para Outubro de 2015.

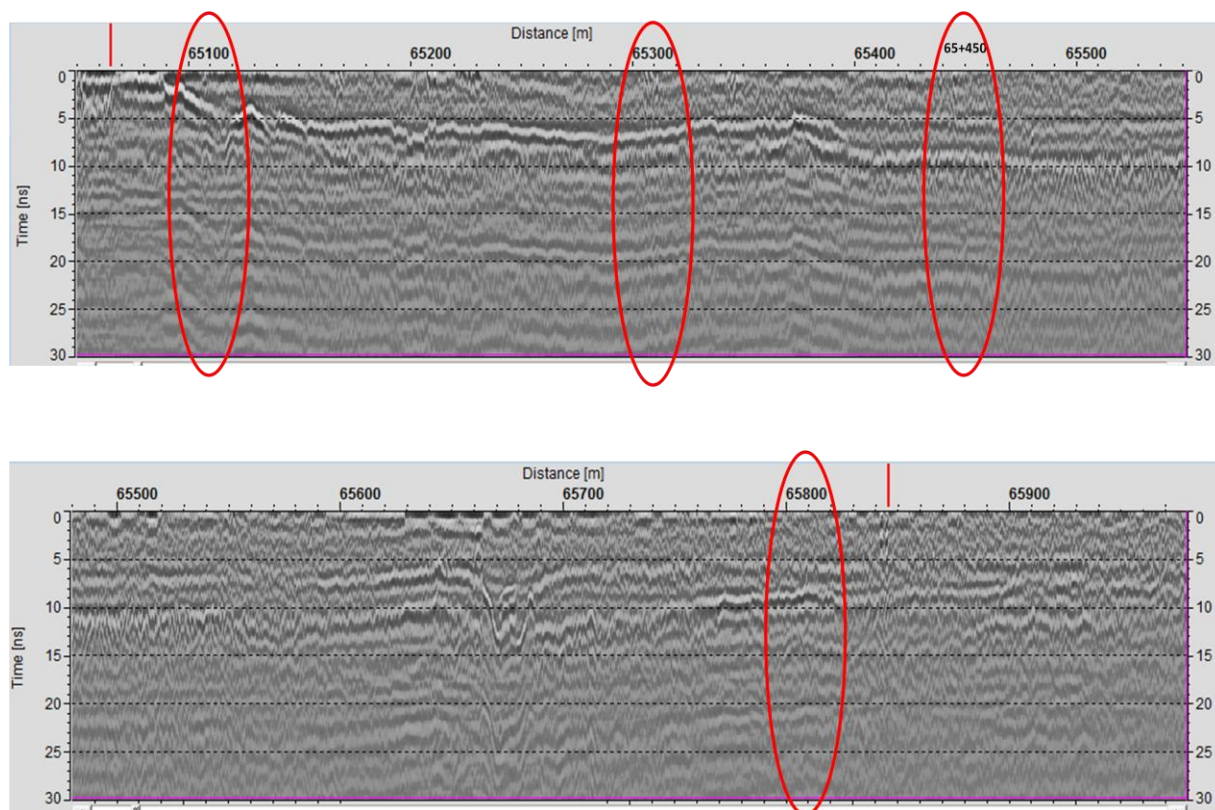


Figura VI.3. Reflexões do GPR no caso de estudo 1 - Outubro de 2015

Como se pode analisar na Figura VI.3, e tal como nas reflexões de Maio de 2013, as reflexões apresentadas pelo GPR são muito distintas em cada ponto. Não tendo havido intervenção nesta zona é de notar que os 3º e 4º pontos continuam a ser os mais contaminados.

De seguida irão ser apresentados os valores das constantes dieléctricas em cada camada de cada ponto, calculadas como anteriormente referido, tendo como base os resultados das reflexões medidas pelo GPR.

Nestes pontos, à semelhança do procedimento seguido para o ano de 2013, adoptou-se uma espessura de 30 cm a cada 5 ns.

Tabela VI.10. Resultados das constantes dielétricas no caso de estudo 1 – Outubro de 2015

RESULTADOS DE OUTUBRO DE 2015		1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
		65.100	65.300	65.450	65.800
1ª CAMADA	tw (ns)	3,406	6,943	4,716	4,978
	e (m)	0,15	0,35	0,3	0,25
	ε	11,585	8,842	5,552	8,908
2ª CAMADA	tw (ns)	-	-	3,799	3,406
	e (m)	-	-	0,25	0,15
	ε	-	-	5,188	11,585
3ª CAMADA	tw (ns)	-	-	-	4,847
	e (m)	-	-	-	0,2
	ε	-	-	-	13,197

No subcapítulo de VI.IV. Análise dos Resultados, vão ser comparados os resultados do caso de estudo 1 e comparados os diferentes valores de constantes dielétricas nos mesmos pontos e para diferentes anos.

Numa breve análise, pode-se constatar pela Tabela VI.10, que se nota pelos resultados que a zona não foi intervencionada, porque em todos os pontos analisados o valor da constante dielétrica aumentou consideravelmente e a interface detectada na base da camada de balastro tem o mesmo desenvolvimento ao longo do trecho estudado.

VI.III.ii. Caso 2 – Troço E – F

O caso de estudo 2 está situado no local L9 que assenta no troço E (115.000) – F (173.800). Para este caso de estudo foram analisados os seguintes pontos que a Tabela VI.11 apresenta de seguida:

Tabela VI.11. Pontos analisados no caso de estudo 2

NÍVEL DE COLMATAÇÃO DO BALASTRO	1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
VISÍVEL À SUPERFÍCIE				
GPR – PRÓXIMO DA SUPERFÍCIE				
PONTOS (KM)	118.000	118.900	117.600	119.000

De modo a ter uma análise mais completa dos pontos a observar em cada caso de estudo irá também proceder-se ao estudo da geometria da via, do carril e das travessas em cada ponto referido na Tabela VI.12. Este estudo irá permitir a identificação dos problemas existentes e uma posterior comparação entre os pontos dos vários troços de modo a saber se o estado da geometria de via influencia o nível de colmatação do balastro.

Tabela VI.12. Características dos pontos analisados no caso de estudo 2

PONTOS QUILOMÉTRICOS		117.600 (3º PONTO)	118.000 (1º PONTO)	118.900 (2º PONTO)	119.000 (4º PONTO)
ESTADO DE GEOMETRIA DE VIA		Deficiente	Mau	Aceitável	Aceitável
CARRIL	TIPO	54 E1	54 E1	54 E1	54 E1
	ESTADO	Deficiente	Mau	Aceitável	Aceitável
TRAVESSAS - TIPO		Madeira	Bibloco	Bibloco	Bibloco

Maio de 2013

De seguida, na Figura VI.4, apresentam-se as reflexões do GPR em cada ponto quilométrico referentes ao caso de estudo 2 – circundadas a vermelho – e, também da sua envolvente. De notar, que no eixo esquerdo do gráfico da reflexão, se encontra o tempo em nano segundos (ns), no eixo superior a distância em metros (m) e, no eixo direito a profundidade em metros (m).

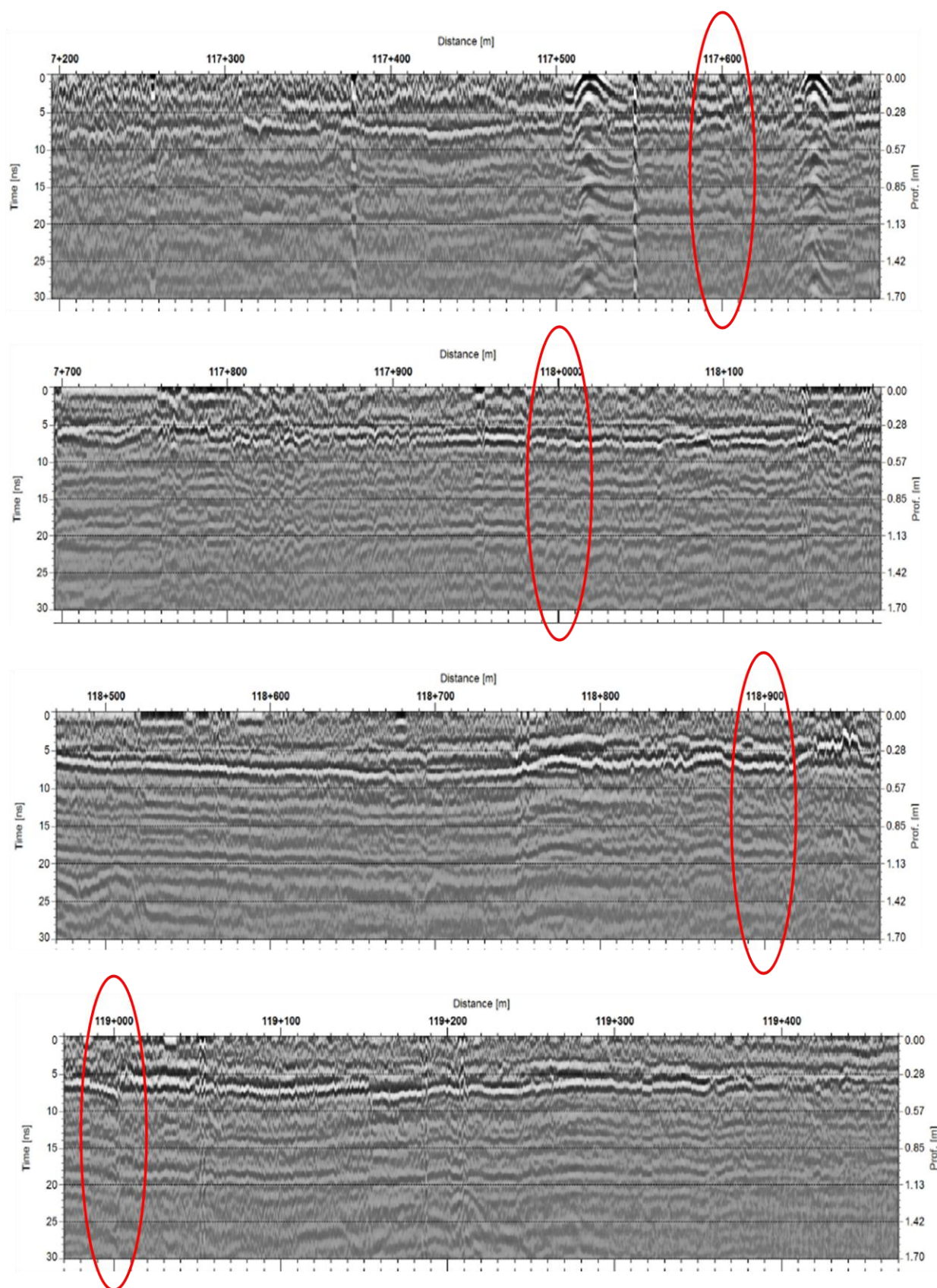


Figura VI.4. Reflexões do GPR nos pontos do caso de estudo 2

Como se pode analisar, na Figura VI.2, as reflexões apresentadas pelo GPR são muito distintas em cada ponto, embora nesta zona as reflexões sejam mais parecidas (em termos de nitidez e numero de camadas) em comparação com o caso 1. Assim, é de referir, que pela análise das reflexões, apenas no 3º ponto existem duas camadas de balastro, sendo que no resto dos casos há apenas uma camada.

Posteriormente, e com base nos resultados das reflexões medidas pelo GPR, foram calculadas as constantes dieléctricas em cada camada de cada ponto, como anteriormente referido.

À semelhança do que ocorreu para o caso de estudo 1, para este caso de estudo também se adoptou uma espessura de 30 cm para cada 5ns. A razão pela escolha desta espessura são as mesmas do que as apresentadas em cima e o facto de não se ter tido a possibilidade de realização de poços.

Tabela VI.13. Resultados das constantes dieléctricas no caso de estudo 2 - Maio de 2013

RESULTADOS DE MAIO DE 2013		1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
		117.600	118.000	118.900	119.000
1ª CAMADA	twf (ns)	6,202	6,835	4	6,745
	e (m)	0,35	0,35	0,25	0,45
	ε	7,055	8,569	5,752	5,048
2ª CAMADA	twf (ns)	-	-	2,588	-
	e (m)	-	-	0,15	-
	ε	-	-	6,688	-

Ao analisar os valores das constantes dieléctricas, pela Tabela VI.13Tabela VI.9, e com o auxílio das reflexões do GPR conseguimos prever o nível de colmatação do balastro em cada ponto. De acordo com esperado – pela zona escolhida precisar de intervenção – os valores das contantes dieléctricas são bastante elevados em cada ponto, tomando apenas valores razoáveis nos 3º (pela existência de duas camadas) e 4º pontos.

Outubro de 2015

No ano de 2015 foram realizadas várias medições, das quais, os resultados que se apresentam de seguida são referentes às realizadas em Outubro. Estas medições têm uma particularidade já que foram efectuadas após um longo período de chuva.

Embora este caso de estudo tenha sido intervencionado foi apenas numa pequena zona, dos pontos quilométricos de 117.550 até 118.220.

De seguida, e em sequência dos resultados de Maio de 2013, apresentam-se, na Figura VI.5, as reflexões do GPR em cada ponto quilométrico referentes ao caso de estudo 2 – circundadas a vermelho – e, também da sua envolvente para Outubro de 2015.

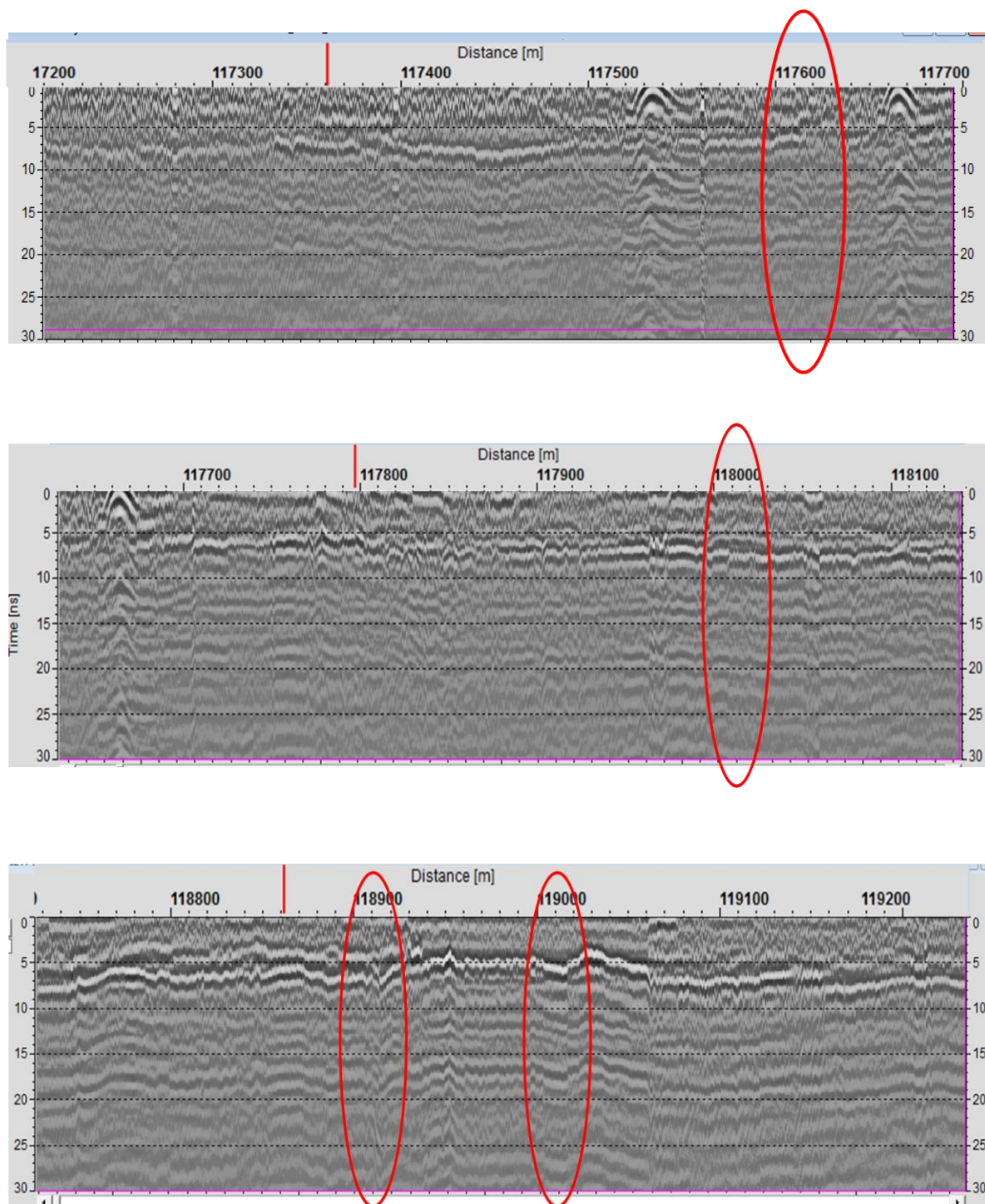


Figura VI.5. Reflexões do GPR no caso de estudo 2 - Outubro de 2015

O caso de estudo 2, tal como descrito em cima, foi uma zona que foi intervencionado entre as medições aqui apresentadas – de Maio de 2013 a Outubro de 2015.

Como se pode analisar na Figura VI.5, as reflexões apresentadas pelo GPR em Outubro de 2015 variam muito em cada ponto, notando-se diferenças significativas no 4º ponto, das apresentadas em Outubro de 2015.

De seguida, na Tabela VI.14, irão ser apresentados os valores das constantes dieléctricas calculadas para cada camada, tendo como base os resultados das reflexões elaboradas pelo GPR Assim podem ser verificados os valores das constantes dieléctricas e poderá analisar-se a sua variação desde 2013, se estes baixaram ou não consideravelmente.

Tabela VI.14. Resultados das constantes dieléctricas no caso de estudo 2 – Outubro de 2015

RESULTADOS DE OUTUBRO DE 2015		1º PONTO	2º PONTO	3º PONTO	4º PONTO
		117.600	118.000	118.900	119.000
1ª CAMADA	tw (ns)	6,226	6,792	4,159	4,789
	e (m)	0,35	0,35	0,25	0,3
	ε	7,11	8,461	6,218	5,726
2ª CAMADA	tw (ns)	-	-	2,521	-
	e (m)	-	-	0,15	-
	ε	-	-	6,347	-

No subcapítulo de VI.IV. Análise dos Resultados, vão ser comparados os resultados do caso de estudo 2 e comparados os diferentes valores de constantes dieléctricas nos mesmos pontos e para diferentes anos.

Numa breve análise, pode-se constatar que a zona referida como tendo sido intervencionada apresenta valores de constantes dieléctricas muito elevadas, restam no entanto dúvidas relativas à localização exacta fornecida pela manutenção.

VI.IV. Análise dos Resultados

Neste capítulo, irá ser discutida, com mais pormenor, a análise entre os valores das constantes dieléctricas em cada caso de estudo relacionando-as entre os diferentes anos. Será analisada a diferença na evolução da constante dieléctrica entre uma via que necessitava de intervenção mas não foi intervencionada e uma via que também precisava de manutenção e foi intervencionada; e também o tema de como as condições da camada de balastro – nível de contaminação e o teor de água do solo -, podem influenciar negativamente os valores das constantes dieléctricas.

O valor da constante dieléctrica mais baixo é de 4,02 no ponto quilométrico 65.450 em Maio de 2013 e atinge o valor superior de 13,197 no ponto quilométrico de 65.800 em Outubro de 2015.

De seguida, irá ser realizada uma breve análise, dividida em duas partes, de como no mesmo caso de estudo os valores das constantes dieléctricas se modificaram consoante a zona tenha sido intervencionada ou não.

De notar que a elaboração desta análise em diferentes ensaios pode ter valores muito díspares da realidade, porque embora se utilize um programa comercial, *RailwayDoctor*, este não é muito fiável no cálculo das constantes dieléctricas, necessitando de uma avaliação realista, *engineering judgement*, e experiência no processamento do sinal do GPR. Dado o cuidado acrescido tido na avaliação dessas constantes dieléctricas, os valores obtidos nesta análise foram muito semelhantes aos da realidade.

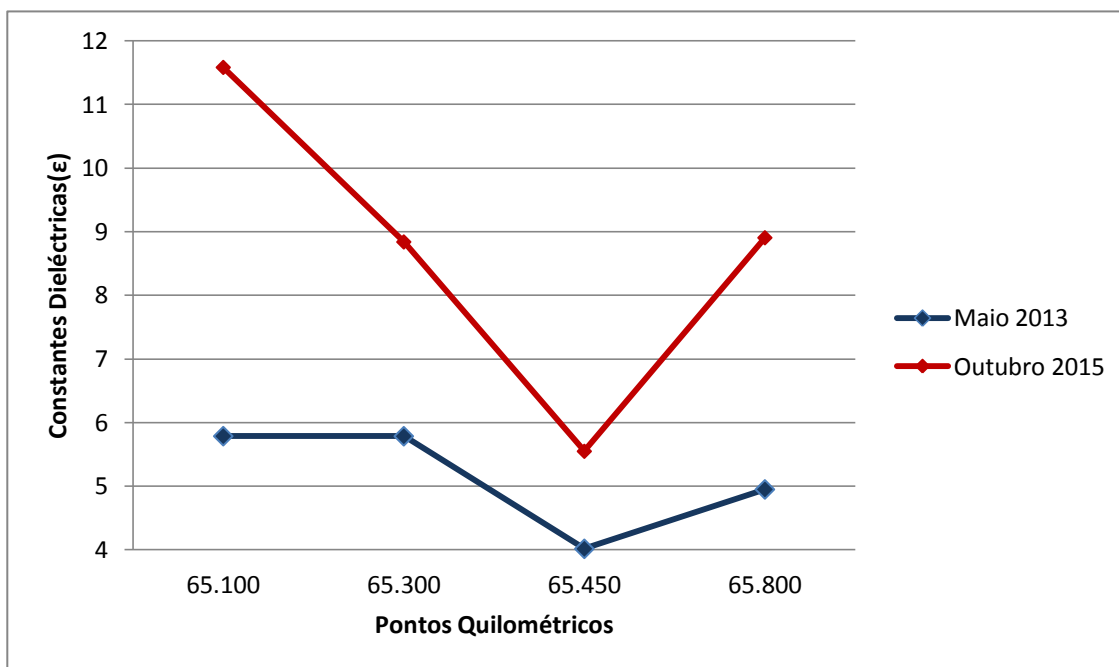


Figura VI.6. Análise das constantes dielétricas para o caso de estudo 1

Na Figura VI.6 é realizada uma análise das constantes dielétricas para o caso de estudo 1, para os dados das diferentes medições que foram referidas anteriormente – Maio de 2013 e Outubro de 2015.

No início do capítulo VI.III.i – Caso 1, onde é realizada uma breve caracterização da zona escolhida para análise, descreve-se a qualidade da estrutura de geometria de via. Por comparação à análise agora realizada constatamos que nos pontos quilométricos de 65.100, 65.300 e 65.800 onde o estado de geometria de via se encontrava caracterizado como “Mau”, é onde as constantes dielétricas calculadas são mais elevadas. Por contraste, no ponto quilométrico de 65.450 onde a constante dielétrica toma o valor mais baixo, de 4,02, o estado da geometria de via é classificado como “Aceitável”.

Pode constatar-se que a medição de Maio de 2013 apresenta os valores das constantes dielétricas diferentes em cada ponto mas não com uma variabilidade tão grande como na medição efectuada em Outubro de 2015. Assim, pode também verificar-se que em relação a Maio de 2013 o valor das constantes dielétricas subiu drasticamente em três dos pontos apresentados.

Isto poderá dever-se ao facto de, como a zona já precisava de ser intervencionada aquando da primeira medição, nos pontos em que se encontrava em pior estado (65.100; 65.300 e 65.800), em dois anos o seu estado agravou-se drasticamente. Ou seja, quanto mais degradada está a estrutura de geometria de via e quanto mais contaminado se encontra o balastro mais depressa se agrava o estado da camada de balastro. Este aumento drástico de alguns valores das constantes dieléctricas também poderá estar relacionado à medição de Outubro de 2015 ter sido realizada depois de uma longa época de chuvas.

É de notar a rapidez com que a camada de balastro ficou neste mau estado. Por exemplo, se analisarmos o ponto 65.100, o ponto mais extremo, constatamos que em apenas dois anos o valor da constante dieléctrica mais que duplicou. Se estes pontos críticos não forem intervencionados rapidamente pode levar a restrições drásticas de velocidade de circulação.

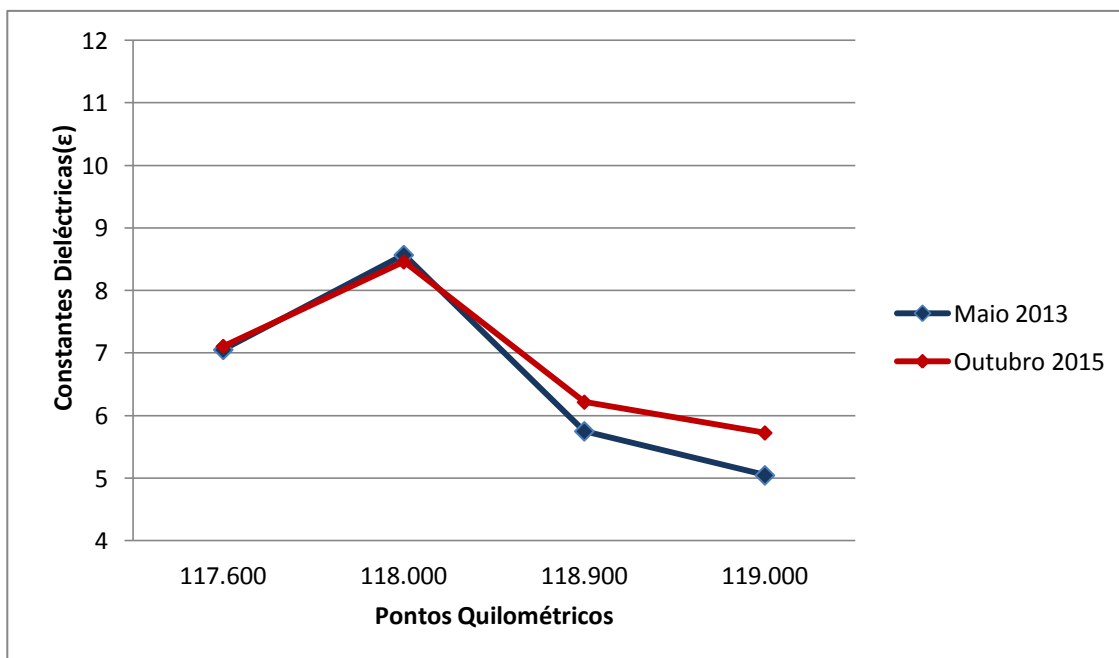


Figura VI.7. Análise das constantes dieléctricas para o caso de estudo 2

Na Figura VI.6 é realizada uma análise das constantes dieléctricas para o caso de estudo 2, para os dados das diferentes medições que foram referidas anteriormente – Maio de 2013 e Outubro de 2015.

Os pontos críticos neste caso de estudo são os pontos quilométricos de 117.600 e de 118.000. Estes valores correspondem também, tal como no caso de estudo 1, ao enunciado anteriormente acerca da qualidade da estrutura de geometria de via. Nos dois primeiros pontos o estado de geometria de via era caracterizado como “Deficiente” e “Mau”, respectivamente. Nos dois últimos pontos esta caracterização da estrutura da geometria de via é dada como “Aceitável”, o que coincide com os valores das constantes dieléctricas inferiores.

Na análise deste gráfico poderá notar-se que não houve quase variação das constantes dieléctricas de uma medição para a outra (de Maio de 2013 para Outubro de 2015). Este facto poderá ser explicado devido a esta zona ter sido intervencionada entre as duas medições. Com a intervenção conseguiu-se combater o aumento drástico das constantes dieléctricas (como ocorreu no caso de estudo 1) e por sua vez, mantê-las mais ao menos nos mesmos valores.

Por último é de referir que se verifica uma diferença notável entre duas zonas que precisavam de intervenção e que uma não foi intervencionada e outra foi. Na zona que não houve intervenção nota-se um aumento notório dos valores das constantes dieléctricas nos pontos em que estes valores já eram considerados muito altos. Por sua vez, na zona em que não houve intervenção nota-se que os valores das constantes dieléctricas quase não se alteraram.

VII. TÉRMINO

VII.I. Principais Conclusões

Na presente dissertação foram abordados em pormenor os equipamentos de inspecção mais recentes e mais utilizados nas infraestruturas ferroviárias, o veículo de inspecção da via EM 120 e o sistema de avaliação em contínuo da condição das camadas da via, o radar de prospecção (GPR).

O veículo EM 120 é um veículo de inspecção motorizado que tem a capacidade de avaliar as condições de via de forma rápida, não destrutiva e com elevada precisão, permitindo a sua inspecção ser realizada a uma velocidade de 120 km/h, ou seja, velocidades bastante elevadas.

O radar de prospecção (GPR) é também um método não destrutivo mas para avaliar as condições da infraestrutura ferroviária. O GPR é um método geofísico que usa impulsos de radar para criar uma imagem radiológica da sub-superfície. Esse equipamento funciona através de ondas electromagnéticas de curta duração, enviadas para a subestrutura através de uma antena emissora e recebidas através de uma antena receptora. Posteriormente é possível determinar a espessura da camada ensaiada com base nos sinais reflectidos na interface entre as camadas de materiais diferentes que se encontrem sob a superfície e tendo em conta a amplitude da onda e o tempo percorrido pela mesma.

O objectivo deste trabalho consistiu em relacionar estes dois equipamentos, o veículo EM 120 e o método GPR, para que o tempo de inspecção das vias férreas fosse diminuído, com base na antecipada caracterização dos parâmetros electromagnéticos dos materiais ferroviários, em especial, do balastro contaminado com solo.

Desenvolveram-se ensaios em laboratório que simulam as várias hipóteses de contaminação do balastro que podem existir numa via tradicional, variando o nível de contaminação do balastro e o teor em água do solo. Estes ensaios foram realizados utilizando diversas antenas com frequências diferentes para avaliar a influência da frequência no valor da constante dieléctrica e averiguar a adequabilidade da utilização das antenas a cada situação. Geralmente, as antenas com frequências baixas são mais recomendadas para medição de espessuras enquanto as de

frequência alta por terem uma maior resolução, utilizam-se na determinação do nível de contaminação do balastro.

Posteriormente, desenvolveram-se ensaios numa via em serviço para que se consolidasse numa perspectiva mais ligada à realidade, os ensaios realizados em laboratório. Estes ensaios foram realizados em 4 pontos e em duas zonas distintas ao longo de uma infraestrutura ferroviária. Por sua vez, foram realizadas também várias medições ao longo de dois anos, pelo que foram escolhidas duas dessas medições, as realizadas em Maio de 2013 e em Outubro de 2015.

A análise dos casos de estudo, tanto de laboratório como na via em serviço, teve como foco principal o estudo da alteração dos valores das constantes dieléctricas dependendo das variações impostas da contaminação da camada de balastro em cada ponto e do teor de água do solo.

Na análise dos casos de estudo em laboratório, verificou-se que quanto maior a contaminação do balastro e maior o teor de água no solo, maior será a constante dieléctrica. Verificou-se também que este valor sobe drasticamente no nível máximo de contaminação e de teor de água impostos.

A análise efectuada nos casos de estudo em laboratório foi confirmada aquando da realização dos casos de estudo em serviço. Isto porque conseguiu-se comprovar que os valores da constante dieléctrica sobem drasticamente quando na camada de balastro há mais contaminação e, principalmente, quando esta não é intervencionada atempadamente.

Nos casos de estudo da via em serviço como foram analisadas duas medições, realizadas em Maio de 2013 e Outubro de 2015, conseguiu-se avaliar a evolução de cada zona, a que não foi intervencionada e a que foi intervencionada. Primeiro, relacionou-se a qualidade da estrutura da geometria de via com os resultados das constantes dieléctricas obtidas do GPR nos casos de estudo da via em serviço. Constatou-se assim, que as duas estão directamente relacionadas, ou seja, como exemplo, no caso em que a estrutura de geometria de via era classificada como “má”, os resultados das constantes dieléctricas, nesses pontos, são muito altos, ou seja, fora dos limites aceitáveis para o material estudado. Por sua vez, se a estrutura de via apresentava uma condição “aceitável”, nesses pontos os valores das constantes dieléctricas eram os mais baixos da zona.

De notar, que no caso de estudo 1, onde não foi intervencionada a via em serviço, os valores das constantes dieléctricas subiram consideravelmente entre uma medição e outra (Maio de 2013 a

Outubro de 2015). Isto deve-se ao facto que as condições da camada de balastro agravam consideravelmente se não for realizada uma intervenção atempada. Ao contrário, na zona que foi intervencionada os valores das constantes dieléctricas mantiveram-se praticamente iguais nas duas medições estudadas (Maio de 2013 e Outubro de 2015).

Quanto à aplicabilidade do método, do radar de prospecção, este é bastante útil porque é um método rápido que detecta as mudanças na estrutura – ou seja os eventos que esta tem, tais como as pontes e túneis -, conseguindo-as localizar perfeitamente ao longo da via. Mesmo sem interpretando os problemas de via, este dá informação sobre a continuidade na estrutura e consequentemente poderá ser útil na avaliação da variabilidade da condição da mesma.

Por último, resta acrescentar as dificuldades tidas na medição das constantes dieléctricas ao longo do caso de estudo da via em serviço, porque embora tenha sido utilizado um programa comercial, *RailwayDoctor*, este sofre de muitas lacunas. É necessário prever com base na experiência e na boa prática qual é o 0 em cada ponto e em cada camada e torna-se muito ambíguo o cálculo das constantes dieléctricas. Infelizmente, esta ambiguidade resulta num processo de cálculo muito lento e exaustivo.

VII.II. Desenvolvimentos Futuros

Como desenvolvimentos futuros é necessário comprovar os resultados obtidos em laboratório com os casos de estudo realizados na via em serviço, como por exemplo, realizar poços, nos troços analisados, para análise de contaminação do balastro e do teor em água o solo de contaminação e para comprovar a espessura das camadas. Conjuntamente com a abertura de poços e recolha de material, deverão ainda ser realizados, ao mesmo tempo, ensaios com o radar de prospecção nos mesmos troços, para que exista uma maior fiabilidade da análise. Isto é, se os ensaios com o radar forem realizados perto da realização dos poços a fiabilidade dos resultados obtidos depois da análise dos dados é muito maior porque os dois ensaios reflectem as mesmas condições, de contaminação e principalmente de teor de água do solo.

Em relação às conclusões retiradas da análise das constantes dieléctricas deverão ainda ser realizados mais estudos, isto é, ensaios em laboratório, e posterior análise de diferentes vias férreas longo do país, para que a localização das mesmas seja tido em conta, e em diferentes alturas do ano, ou seja, vários níveis de pluviosidade. O objectivo desta análise será de realizar

estudos com diferentes condições, isto é, diferentes níveis de contaminação do balastro e com diferentes teores em água, para que se possa estudar em pormenor a influência da variação destas condições nas constantes dieléctricas dos materiais.

Para uma melhor gestão da inspecção das vias férreas portuguesas e consequente manutenção e conservação das mesmas, é necessário que se desenvolva critérios de classificação específicos para o nível de contaminação em Portugal. Os critérios que constam do programa de interpretação do GPR utilizado foi desenvolvido para o norte da Europa, mais propriamente, Finlândia, e ao serem aplicados directamente nas vias férreas portuguesas, assumem as mesmas condições de via em Portugal, o que não ocorre, exemplo disto, são as condições climáticas e consequentemente a geometria da subestrutura.

As condições climáticas são um grande entrave neste tipo de medição, porque se houver períodos de chuva prolongados, as medições com o GPR são fortemente afectadas. Contudo, não existe só este obstáculo, o tipo e a dimensão do material utilizado também afecta e muito os valores das constantes dieléctricas.

Contudo, esta solução só podia ser posta em prática se se realizassem ensaios em laboratório com base em amostras recolhidas em campo, em condições reais, para uma vasta gama de contaminação e de teor de água, acompanhadas com a realização de ensaios com o GPR ao mesmo tempo.

De modo a ter-se em conta mais detalhes da via, e consequentemente, uma melhor análise das condições desta, é preciso que haja uma aplicação directa dos valores das constantes dieléctricas medidos com o radar de prospecção, GPR, com as medições da geometria de via efectuados com o veículo de inspecção de via, EM 120.

No futuro, tem de haver uma melhor gestão da combinação entre os valores da medição de geometria de via e os ensaios com o GPR por forma a avaliar a influência das condições de fundação na granulometria de via. E, eventualmente, prever a evolução ao longo dos anos do estado de geometria de via e da sua estrutura relacionando-a com os valores das constantes dieléctricas previstos para os mesmos casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baldeiras, M. (2008). “Monitorização da Infra-estrutura Ferroviária”. Curso Formação em Engenharia Ferroviária. Módulo 4. REFER, E.P, 2008, Lisboa.

Baldeiras, M. (2013). “Monitorização da Infra-estrutura Ferroviária”. Curso Formação em Engenharia Ferroviária. Módulo 4. REFER, E.P, 2008, Lisboa.

Bance (2012). www.bance.com. Manufacturers and suppliers of portable railway track maintenance plant and equipment, Consultado em 2015.

Chiara, F. (2014), “ Improvement of railway track diagnosis using ground penetrating radar” tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, University of Rome, 2014

CP (2012). <http://www.cp.pt/>. Rede Comboios de Portugal, E.P, Consultado em 2015.

Conyers, Lawrence B. And Dean Goodman 1997 Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. Walnut Creek, CA.: Altamira Press, Consultado em 2015.

Daniels DJ (ed.) (2004). Ground Penetrating Radar (2nd ed.). Kernal (Institution of Engineering and Technology)., Consultado em 2015

Delgado, R. (2008). “Descarrilamento no Tua em 22 de Agosto de 2008”. Relatório Preliminar. CSF, FEUP, 2008, Porto.

Dispostel (2015), <http://www.dipostel.fr/en/railway-instruments/miniprof-rail-profile-measurements-0>, Consultado em 2015.

Doc. (2014), Documento Interno Confidencial com os dados de Caso de Estudo de Via em Serviço

Feldman, F. and Nissen, D.. (2002). “Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage voids contamination. In Proceedings of the conference on Railway Engineering . Australia : Railway Technical Society of Australia” , 2002.

Fernave (2003). “Manual de Via”. Fernave. 2003.

Fontul, S. (2004). “Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests”. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade de Coimbra, 2004.

Fontul, S. (2011). “Constituição, Monitorização e Reabilitação de Caminhos-de-Ferro”. Palestra no âmbito da disciplina de Conservação de Vias de Comunicação do Mestrado em Construção Urbana, ISEC, 2011, LNEC.

Fontul, S. (2012). “Non Destructive Tests for Evaluation of Railway Platforms – Application of Ground Penetrating RADAR; 1st International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance”. Espanha : s.n., 2012.

Fontul, S. (2013). “Slides das aulas da disciplina Infraestruturas ferroviárias e portuárias”. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2013

Fontul, S. and Fortunato, E. (2010). “Caracterização de inertes da Pedreira GMC para utilização em balastro ferroviário”. s.l. : LNEC, 2010.

Fortunato, E. (2005). “Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga”. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade do Porto, 2005, Porto.

Guillaume Foeillet, F. C. (2008). "IRIS 320 is a global concept inspection vehicle, merging engineering and R&D tools for infrastructure maintenance"., Consultado em 2015

Leal, D. (2008). “Gestão da Conservação em Vias-Férreas”. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2008, Coimbra.

Leonardo, A. (2006). “Uma Contribuição para a Melhoria do Processo de Análise dos Dados Coletados na Inspecção da Via da MRS”. Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas, Instituto Militar de Engenharia, Academia MRS, 2006, Rio de Janeiro.

Lopes, A. (2013). “Avaliação da degradação de vias férreas. Caracterização do balastro com recurso ao Radar de Prospecção. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

Indraratna, Buddhima, Su, Li-jun and Rujikiatkamjorn, Cholachat. (2011). "A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling". s.l. : NRC Research Press, 2011.

IT.GEO.001. (2008). “Fornecimento de Balastro e Gravilha”. REFER, EP., 2008.

Mermcgroup (2015), <http://www.mermcgroup.com/inspection-technology/track-measurement/60/1/rail-profile.php>, Consultado em 2015.

MRS Logística S.A. (2012). <http://www.mrs.com.br/>. MRS Logística S.A., Consultado em 2015.

Pedrosa, M. (2009). “Caracterização da Fundação de Infra-Estruturas de Transporte com recurso ao GPR. Identificação das camadas de apoio”. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

Pereira, D. (2002). “Glossário de Termos Ferroviários”. Materiais para Infraestruturas de Transportes. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

Pethoplan gmbh (2015), http://www.pethoplan.de/index.php?main_id=2&sub_id=21&lang=en, Consultado em 2015.

Plasser & Theurer (2012). <http://www.plassertheurer.com>. Consultado em 2015.

REFER (2001). “VIV02 (EM 120) - Veículo de inspeção de via. Descrição dos sistemas de medição”. REFER – Rede Ferroviária Nacional, EP, 2001, Lisboa.

REFER, E.P. (2008). “Curso formação em Engenharia ferroviária - Módulo 4 - Monitorização da Infra-estrutura Ferroviária”. 2008.

REFER (2011). <http://www.refer.pt/>. Rede Ferroviária Nacional, E.P., Consultado em 2015.

Revista Logística (2015)- www.imam.com.br/logistica/noticias/transportes/1594-vli-amplia-manutencao-de-ferrovias, consultado em 2015.

Rodrigues, D. (2012). “Manutenção e conservação de vias férreas: análise de casos práticos”. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra : s.n., 2012.

Silva, E. (2006). “Análise da Evolução dos Defeitos da Via Permanente da MRS para Planejamento de Intervenções Preditivas de Manutenção”. Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas, Instituto Militar de Engenharia, Academia MRS, 2006, Rio de Janeiro.

Silva, T. (2012). “Inspeção e Reabilitação de Infraestruturas Ferroviárias”. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa : 2012.

SNDE (2015), http://ikpark.comcatalog.com/pagegenerater.asp?catalogid=ikpark&language=k&pag_ecode=kpage05b, Consultado em 2015.

Somague (2015), http://www.somague.pt/site/ver_maquina.asp?id_maquina=79&id=34&lg=pt&sub_div=5, Consultado em 2015.